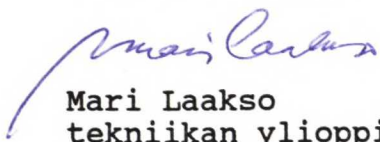


**TEODOLIITTIHAVAINTOIHIN PERUSTUVA
AVARUUSETEENPÄINLEIKKAUS, SEN LASKENTA
JA JÄRJESTELMÄKALIBROINTI**

Teknillisen korkeakoulun rakennus- ja
maanmittaustekniikan osaston maanmit-
taustekniikan laitoksella tehty dip-
lomityö.

Espoo, toukokuu 1993


Mari Laakso
tekniikan ylioppilas



Valvoja: Prof. Teuvo Parm
Ohjaaja: Yliass. Jaakko Santala

Tekijä ja työn nimi: Mari-Anne Laakso

Teodoliittihavaintoihin perustuva
avaruuseteenpäänleikkaus, sen las-
kenta ja järjestelmäkaliibrointi

Päivämäärä: 10.5.1993

Sivumäärä: 73

Osasto: Rakennus- ja maanmittaustekniikan
osasto, maanmittaustekniikan
laitos

Professuuri:
Maa-6.
Geodesia

Työn valvoja: Prof. Teuvo Parm

Työn ohjaaja: Yliass. Jaakko Santala

Työssä on tutkittu mittausten menetelmää, joka perustuu kolmi-
ulotteiseen teodoliittihavaintojen eteenpäin leikkaukseen.

Työn ensimmäinen osa käsittelee EPLA (Eteenpäin Leikkaus
Avaruudessa)-järjestelmiä yleensä. Laskentamalleista on
lyhyesti esitetty kolme erilaista menetelmää.

Tarkemmin on otettu käsittelyyn Leica Ltd.:n TMS (Theodo-
lite Measurement System)-järjestelmä, jonka laskentaohjel-
ma on nimeltään ManCAT. Tätä järjestelmää on myös käytetty
työn yhteydessä tehdyissä testimittauksissa. TMS-järjes-
telmällä mittaaminen ja sen käyttö on selitetty käyttäen
pohjana valmistajan tekemää manuaalia.

Työn toisen osan muodostaa yleinen EPLA-järjestelmien
tarkkuuden tarkastelu. Tarkkuuden määrittämiseksi tehtiin
Geodesian ja kartografian laboratorion kokesalissa testi-
mittauksia. Mittauksissa tehtiin havaintoja kaikkiaan kuu-
delta kannalta kokesalin seiniin ja kattoon asetettuihin
tähyksiin sekä kohdetilassa oleviin mittatankoihin.

Testimittauksien tuloksista laskettiin järjestelmälle epä-
varmuus eli hajonta ja epätarkkuus, joka sisältää hajonnan
ja systemaattisten virheiden vaikutuksen. Epävarmuus saa-
tiin eri kannoilta tehdyistä kohdepistehavainnoista. Epä-
tarkkuudelle saatiin arvo laskemalla mittatankoihin teh-
dyistä havainnoista pituuksia ja vertaamalla eri kannoilta
saatuja pituuksia kalibroituuihin arvoihin.

Lopuksi työssä on ehdotettu testimittauksien kaltaista
havainto- ja laskentamenettelyä järjestelmien yleiseksi
kalibrointimenettelyksi.



Author and name of thesis: Mari-Anne Laakso

Spatial Intersection with
Theodolites, Calculation and
System Calibration.

Date: 10.5.1993

Number of pages: 73

Department: Department of Civil
Engineering and Surveying,
Faculty of Surveying

Professorship:
Maa-6.
Geodesy

Supervisor: Prof. Teuvo Parm

Instructor: D. Jaakko Santala

In this thesis the survey method based on three dimensional theodolite intersection was considered.

The first part of the thesis deals with the intersection systems in general. Three different calculation methods are shortly presented.

More accurately the TMS (Theodolite Measurement System) and it's calculation program ManCAT by Leica Ltd. is presented. This system is also used in the test surveys done for this work. Presentation of the TMS-system is based on the manual made by the manufacture.

The second part consists of the accuracy study made for theodolite intersection systems in general. To determine the accuracy test surveys were made in the instrument hall of the Laboratory of Geodesy and Cartography. Observations were made from six bases to the targets in the roof and walls and also to the scale bars situated in the target space.

From the results the uncertainty i.e. deviation and the inaccuracy which includes the deviation and the influence of systematic errors, were calculated. The uncertainty was calculated from the target point coordinates. The value of inaccuracy was calculated from the lengths of the scale bars measured from different bases compared with the calibrated ones.

In the end there is a proposal for the calibration method which is similar to the method of the test surveys studied here.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Teknillisen Korkeakoulun Rakennus- ja maanmittaustekniikan osaston Maanmittaustekniikan laitoksen Geodesian ja kartografian laboratoriossa.

Haluaisin esittää kiitokseni työn valmistumisesta kaikille siinä edesauttaneille, erityisesti työn ohjaajalle TkT Jaakko Santalalle.

Espoo, toukokuu 1993

Mari Laakso

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT	2
ALKUSANAT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
 1 JOHDANTO	 6
 2 EPLA-MITTAUSJÄRJESTELMÄ	 6
2.1 Järjestelmän kokoonpano	7
2.2 Mittauskoordinaatisto	8
2.3 EPLA-ratkaisu	9
2.3.1 Cooperin ja Allanin malli	10
2.3.2 Pienimmän neliösumman menetelmä.....	11
2.3.3 Sädekimppumenetelmä	13
 3 JÄRJESTELMÄN ORIENTOINTI	 14
3.1 Ohjattu kahden teodoliitin orientointi	15
3.2 Vapaa orientointi	17
 4 MITTAAMINEN	 17
4.1 Mittauksen suunnittelu	18
4.2 Yhdeltä kannalta mittaaminen	18
4.3 Suurten kohteiden mittaaminen	20
 5 TULOSTEN TULKINTA	 22
5.1 Muodon sovittaminen	22
5.2 Muotojen määrittely	24
5.3 Analyysit	25
 6 TARKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	 27
6.1 Laskentamenetelmä	28
6.2 Kalusto	29
6.3 Mittaustilanne	31
 7 JÄRJESTELMÄN TESTAAMINEN	 31
7.1 Mittaukset	32
7.2 Laskenta	34
7.2.1 Lattahavainnot	35
7.2.2 Kohdepistehavainnot	40

8 JÄRJESTELMIEN KALIBROINTI	42
9 LOPPUSANAT	47
10 LÄHDELUETTELO	48
11 LIITE	
Lattahavaintojen regressioanalyysit	50

1 JOHDANTO

Tässä työssä on tarkasteltu teodoliittien käyttöön perustuvaa EPLA (EteenPäin Leikkaus Avaruudessa)-mittausperiaatetta yleisesti, yksityiskohtaisemmin on perehdytty Leica Ltd.:n TMS (Theodolite Measurement System), ManCAT-järjestelmään. Työn tarkoituksena on toimia johdantona TMS-järjestelmän käyttöön. Työn luvut 3, 4 ja 5 käsittelevät lähes yksinomaan TMS-järjestelmän ManCAT-ohjelman käyttöä ja toimintaa. Lopuksi on tarkasteltu järjestelmällä tehtyjä mittauksia ja niistä on johdettu järjestelmän epävarmuus ja epätarkkuus. Samoilla perusteilla on myös kehitetty vastaavien järjestelmien kalibrointimenetelmä.

EPLA-periaatteen mukaisten mittausjärjestelmien pääperiaatteena on vähintään kahdella teodoliitilla tehtävät yhtäaikaiset vaaka- ja pystykulmahavainnot kohteeseen. Mittauksilla päästään parhaimmillaan millimetrin sadasosien tarkkuuteen. Järjestelmien käyttöala on erilaisissa rakennusteknisissä ja teollisuuden erikoismittauksissa, missä mitattavat kappaleet ja tarkkuusvaatimukset ovat suuria. Tyypillisiä erikoismittauksia ovat teollisuuden tuotteille suoritettavat tuotannonohjaus- ja tarkastusmittaukset sekä erilaisten rakenteiden muodon määrittäminen ja niissä tapahtuvien muodonmuutosten seuraaminen.

TMS-järjestelmään voidaan enimmillään liittää kahdeksan teodoliittia, mutta tässä työssä, ellei toisin mainita, tarkastellaan tilanteita, joissa on käytössä kaksi teodoliittia.

2 EPLA-MITTAUSJÄRJESTELMÄ

EPLA-mittausjärjestelmällä tarkoitetaan kahden tai useamman teodoliitin tietokoneeseen liitettyä kokonaisuutta. Menetelmä perustuu pisteen avaruuskoor-

dinaattien määrittämiseen teodoliittien vaaka- ja pystykulmahavainnoista. Teodoliitit voidaan pystyttää joko tunnetuille tai mielivaltaisille pisteille ja ne on orientoitava ennen mittauksia. Menetelmän geometrinen mittausperiaate ei ole uusi, mutta vasta mikrotietokoneet ja elektroniset teodoliitit ovat tehneet siitä käyttökelpoisen esim. tarkoissa teollisuusmittauksissa, missä tuloksia käsitellään heti mittauspaikalla.

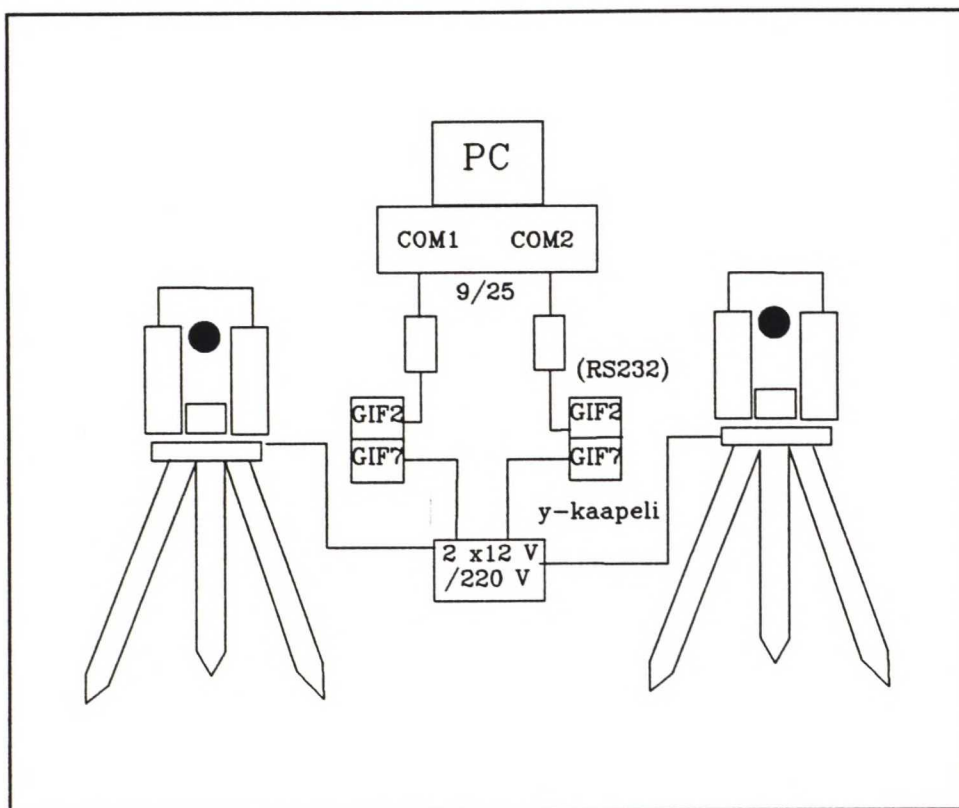
2.1 Järjestelmän kokoonpano

EPLA-mittausjärjestelmä koostuu kahdesta tai useammasta elektronisesta teodoliitista, joihin on kytketty joko maastotallennin tai yleensä suoraan tietokone. Tietokoneessa oleva laskenta- ja analysointiohjelma on oleellinen osa järjestelmää. Mittaustietojen hyväksikäytössä vaaditaan lisäksi graafinen käyttäjäliittymä. Graafinen tulosten tarkastelumahdollisuus voi kuulua mittausjärjestelmän alkuperäiseen ohjelmistoon tai järjestelmästä voi olla liitännäismahdollisuus johonkin ulkopuoliseen, suunnitteluun tarkoitettuun CAD-tyyppiin ohjelmaan.

Mittakaavan määrittämistä varten tarvitaan perinteinen kantalatta tai, nykyään yleisemmin, mittatanko eli mittakaavajana. Mittatangon pituus tulee olla tarkasti laserinterferometrillä määritetty ja sen muutokset lämpötilan ja kosteuden mukaan tulee tuntea ja ottaa mittauksessa huomioon.

Leican TMS-järjestelmässä asetetaan mittauslaitteistolle tiettyjä erikoisvaatimuksia. Teodoliiteiksi voidaan valita Wildin tai Kernin valmistamia tietyn sarjan teodoliitteja: Wild T1600, T2000, T2000S, T2000SA, T2002, T3000, T3000A tai Kern E2, E2-I. Teodoliittien erotuskyky on 0,1 milligonia ja kohdekoordinaattien mittauksen tarkkuus on parhaimmillaan millimetrin sadasosa (TMS MANUAL, 1990). ManCAT-ohjelma sallii enim-

millään kahdeksan teodoliitin liittämisen järjestelmään.



Kuva 1. TMS-laitteiston kokoonpano.

Tietokoneeksi vaaditaan vähintään AT-tasoinen mikrotietokone, jossa on vähintään 640 Kb RAM-muistia ja 10 megatavun kovalevy. Järjestelmän liikuteltavuuden vuoksi on tietokoneen hyvä olla kannettavaa mallia. Teodoliittien ja tietokoneen välille tarvitaan tiedonsiirto-liitännät (GIF-2 ja GIF-7). Virtalähteenä voidaan käyttää joko verkkovirtaa tai kahta 12 V (24 Ah) akkua. (Kuva 1).

2.2 Mittauskoordinaatisto

EPLA-mittauskoordinaatisto on teodoliitin akselien määrittämä paikallinen suorakulmainen avaruuskoordinaatisto. Kun järjestelmän teodoliitit numeroidaan orien-

toitaessa, muodostuu peruskoordinaatiston origo ensimmäisenä olevan teodoliitin akselien leikkauspisteeseen. Z-akseli on positiivinen ylöspäin ensimmäisen teodoliitin pystyakselin eli luotiviivan suunnassa. X-akseli on suorakulmaisesti z-akseliin nähden osoittaen kohti toista teodoliittia. Y-akselin suunta valitaan niin, että koordinaatistosta tulee suorakulmainen oikean-kädensysteemin mukaan. Kantapisteet kuvaavat teodoliittien akselien leikkauspisteitä, eivät pisteitä, joille teodoliitit on pystytetty. Mittakaava koordinaatistoon saadaan tarkasti määritetyn mittatangon tai kantalatan avulla.

2.3 EPLA-ratkaisu

Laskettaessa kohteen 3D-koordinaatteja (x,y,z) vaakaja pystykulmahavainnot on muunnettava avaruuskulmiksi sekä käytettävä aitoa 3D-laskentamallia. Jos lasketaan koordinaatit x ja y tasoleikkauksena vaakakulmia käyttäen ja erikseen pystykulmien avulla z -koordinaatti kahden korkeuden z_1 ja z_2 keskiarvona, syntyy 2D+1D-malli. Tällainen malli on EPLA-ratkaisuna väärä, eikä anna minkäänlaista kontrollia tähtäyssäteiden leikkauksen hyvyydestä. Cooper (1987, s.158) on esittänyt esimerkin, missä kohdekoordinaatit on laskettu sekä avaruussuuntia käyttäen että tasoleikkauksella ja kahden korkeuden keskiarvona. Tulokset eroavat toisistaan kunkin koordinaatin kohdalla useita millimetrejä. Ero kasvaa edelleen mittausgeometrian huonontuessa.

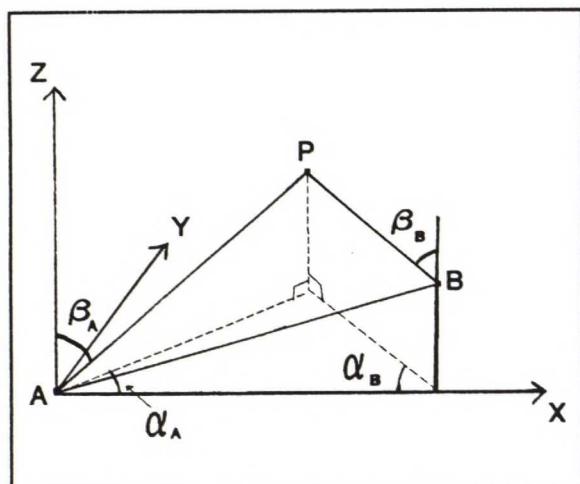
EPLA-periaatteella tehtyjä havaintoja laskettaessa on aina käytettävä kolmiulotteista mallia, sillä 2D+1D-malli antaa virheellisiä tuloksia. 2D+1D-malli soveltuu EPLA-mittauksessa vain likiarvojen laskemiseen kolmiulotteista tasoitusta varten.

EPLA-periaatteen mukaisista havainnoista voidaan laskea koordinaatit kolmiulotteisesti ainakin kolmella eri

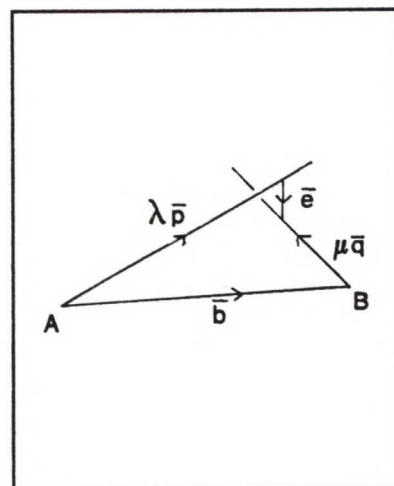
tavalla. Yksi tapa on minimoida tähtäyssäteiden välistä avaruusetäisyyttä. Toinen tapaan käyttää kolmiulotteista verkkotasoitusta. Kolmas tapa on tasoittaa havainnot fotogrammetrian keinoin.

2.3.1 Cooperin ja Allanin malli

Cooperin (1987, s.155) ja Allanin (1988) esittämässä mallissa etsitään kahden teodoliitin tähtäyssäteiden väliin jäävää lyhintä mahdollista avaruusetäisyyttä, erovektorin pituutta; tuloksena saadaan säteiden yhteinen normaali. Menetelmässä kaksi tasattua teodoliittia A ja B on orientoitu keskenään. Kannan AB pituuden määrittämiseksi on tehty havainnot teodoliittien väliin, keskelle kantaa, asetettuun mittatankoon. Teodoliiteilla havaitaan samanaikaisesti pisteeseen P. Pisteeseen P kolmen koordinaatin määrittämiseen on käytössä neljä kulmahavaintoa: α_A , α_B , β_A ja β_B . Teodoliittien sijainnit koordinaatistossa tunnetaan ja tilanne voidaan esittää kuvan 2 kohdan a) mukaisesti.



a)



b)

Kuva 2. a) Avaruusetäisyydenleikkaus pisteeseen P.

b) Leikkaus vektoriesityksenä: Havaintovektorit $\lambda \vec{p}$ ja $\mu \vec{q}$, kantavektori \vec{b} ja erovektori \vec{e} .

Kuvan 2 kohdassa b) esitetään erovektorin sijoittuminen tähtäyssäteiden väliin. Koska tähtäyksiä käsitellään kolmiulotteisina havaintoina, muodostaa erovektori säteiden välisen yhteisen normaalin. Kuvassa kantaa on merkitty vektorilla \bar{b} , tähtäyssädettä AP on merkitty yksikkövektorilla \bar{p} kerrottuna skalaarilla λ ja tähtäyssädettä BP yksikkövektorilla \bar{q} kerrottuna skalaarilla μ . Vektorien komponentit ovat

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} X_B \\ 0 \\ Z_B \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\bar{p} = \begin{bmatrix} \sin\beta_A \cos\alpha_A \\ \sin\beta_A \sin\alpha_A \\ \cos\beta_A \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} -\sin\beta_B \cos\alpha_B \\ \sin\beta_B \sin\alpha_B \\ \cos\beta_B \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Havainto- ja orientointivirheistä johtuen vektorit $\lambda\bar{p}$ ja $\mu\bar{q}$ eivät leikkaa. Tähtäyssäteiden välinen avaruusetäisyys \bar{e} voidaan lausua

$$\bar{e} = -\lambda\bar{p} + \bar{b} + \mu\bar{q} \quad (2.12)$$

Tästä yhtälöstä ratkaistaan skalaareille λ ja μ arvot, joilla \bar{e} :n pituus on minimi. Skalaarien arvoilla määritetään pisteen P sijainti vektorin \bar{e} keskipisteenä.

2.3.2 Pienimmän neliösumman menetelmä

Suosittelavin malli on käyttää kolmiulotteista verkko-tasoitusta. Siinä tasointu suoritetään kolmioverkon tapaan. Tuntemattomina parametreina tasointuksessa ovat

pisteiden koordinaatit ja teodoliittipisteillä myös orientointituntematon ja luotiviivojen suuntien ero. Havainnot ovat toisistaan riippumattomia kulma- ja etäisyyshavaintoja. Tässä menetelmässä voidaan käyttää hyväksi sarjahavaintomenetelmällä tehtyjä havaintoja.

Tavallisesti tarkastellaan yksinkertaistettua mallia, missä luotiviivat oletetaan samansuuntaisiksi, vaaka-kulmahavaintoja käsitellään atsimuutteina ja mittakaava on määritetty mittatangon avulla. Tuntemattomina parametreina ovat silloin määritettävän pisteen P kolme koordinaattia, x, y, z . Havaintoina ovat kuvan 2 (sivulla 10) kohdan a) mukaiset vaaka- ja pystykulmahavainnot kahdelta teodoliittipisteeltä A ja B pisteeseen P.

Teodoliittipisteiden koordinaatteja pidetään vakion kaltaisina. Lisäksi lähtötietoina ovat pisteen P likiarvokoordinaatit ja havaintojen tasoittamattomat keskivirheet, joina voidaan käyttää yhden suuntahavainnon keskivirheitä. Tasointu suoritetaan iteratiivisesti likiarvokoordinaatteja korjaten. Havaintoyhtälöiden kerroinmatriisiin A tulee havaintoyhtälöt derivoituna kullakin tuntemattomalla. Jokainen havainto muodostaa yhden rivin A-matriisiin. Havaintoyhtälöt ja niiden linearisointi kuvan 2 kohdan a) mukaisessa tilanteessa on esitetty alla (LANKINEN, 1989):

$$f(x, \alpha_A) = \arctan [(X_P - X_A)/(Y_P - Y_A)] - \alpha_A = 0 \quad (2.1)$$

$$A = [(X_P - X_A) \quad -(Y_P - Y_A) \quad -(X_P - X_A) \quad (Y_P - Y_A)]/h_P^2, \quad (2.2)$$

$$\text{missä } x = [X_A \quad Y_A \quad X_P \quad Y_P]^T \text{ ja} \\ h_P^2 = (X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2.$$

$$f(x, \alpha_B) = \arctan [(X_P - X_B)/(Y_P - Y_B)] - \alpha_B = 0 \quad (2.3)$$

$$A = [(X_P - X_B) \quad -(Y_P - Y_B) \quad -(X_P - X_B) \quad (Y_P - Y_B)]/h_P^2, \quad (2.4)$$

$$\text{missä } x = [X_B \quad Y_B \quad X_P \quad Y_P]^T,$$

$h_P^2 = (X_P - X_B)^2 + (Y_P - Y_B)^2$ ja
 α_A, α_B ovat atsimutikulmia teodoliittipisteiltä
 pisteeseen P.

$$f(x, \beta_A) = \arccos [(Z_P - Z_A)/s] - \beta_A = 0 \quad (2.5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -(Z_P - Z_A)(Y_P - Y_A)/s^2/h_P & -(Z_P - Z_A)(X_P - X_A)/s^2/h_P \\ (s^2 - (Z_P - Z_A)^2)/s^2/h_P & \\ (Z_P - Z_A)(Y_P - Y_A)/s^2/h_P & (Z_P - Z_A)(X_P - X_A)/s^2/h_P \\ -(s^2 - (Z_P - Z_A)^2)/s^2/h_P & \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

missä $x = [X_A \ Y_A \ Z_A \ X_P \ Y_P \ Z_P]^T$,
 $s^2 = (X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2$ ja
 $h_P^2 = (X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2$.

$$f(x, \beta_B) = \arccos [(Z_P - Z_B)/s] - \beta_B = 0 \quad (2.7)$$

$$A = \begin{bmatrix} -(Z_P - Z_B)(Y_P - Y_B)/s^2/h_P & -(Z_P - Z_B)(X_P - X_B)/s^2/h_P \\ (s^2 - (Z_P - Z_B)^2)/s^2/h_P & \\ (Z_P - Z_B)(Y_P - Y_B)/s^2/h_P & (Z_P - Z_B)(X_P - X_B)/s^2/h_P \\ -(s^2 - (Z_P - Z_B)^2)/s^2/h_P & \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

missä $x = [X_B \ Y_B \ Z_B \ X_P \ Y_P \ Z_P]^T$,
 $s^2 = (X_P - X_B)^2 + (Y_P - Y_B)^2$,
 $h_P^2 = (X_P - X_B)^2 + (Y_P - Y_B)^2$ ja
 β_A, β_B ovat pystykulmia teodoliittipisteiltä
 pisteeseen P.

2.3.3 Sädekimppumenetelmä

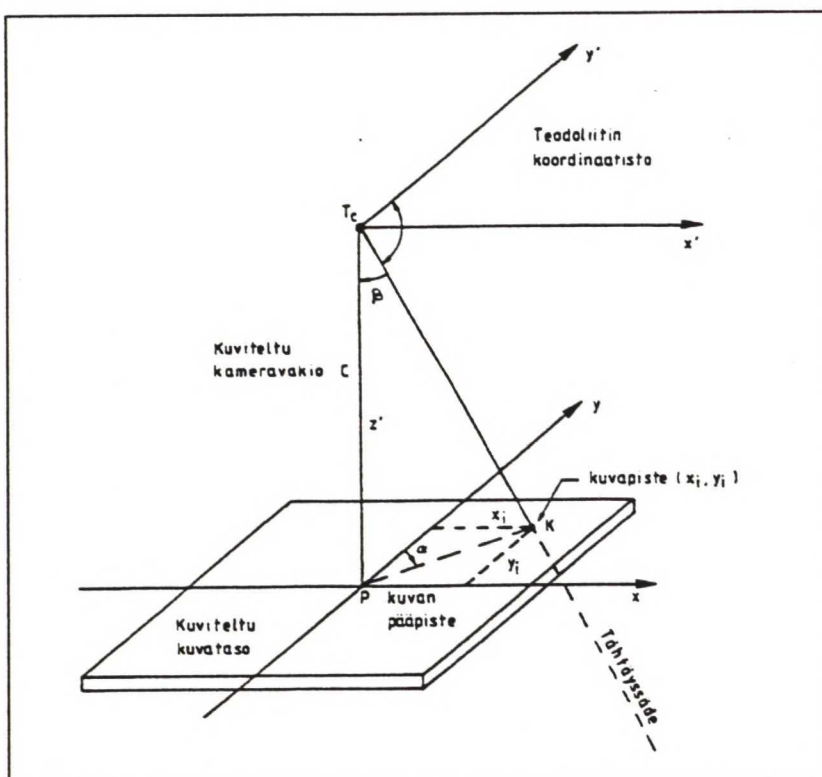
Avaruuseteenpäinleikkaus on mahdollista ratkaista myös muuntamalla kulmahavainnot fiktiivisiksi kuvakoordinaattihavainnoiksi. Tällöin mittaukseen liittyvät tuntemattomat voidaan ratkaista fotogrammetrisella sädekimpputasoituksella. Tähtäyssäteiden vaaka- ja pystykulmahavainto sekä kuviteltu kuvataso esitetään kuten kuvassa 3, seuraavalla sivulla.

Tähtäyssäteen kulmat (α , β) voidaan muuntaa kuvakoordinaattipariksi (x , y), jolloin (KÄRKÄS, 1992)

$$x = c \cdot \tan \beta \cdot \sin \alpha + X_p \quad \text{ja} \quad (2.13)$$

$$y = c \cdot \tan \beta \cdot \cos \alpha + Y_p. \quad (2.14)$$

Fiktiiviset kuvakoordinaatit eivät ole toisistaan riippumattomia, mikä rajoittaa mallin käyttöä. Muutenkin pitäisi pyrkiä käsittelemään laskennassa alkuperäisiä, riippumattomia havaintoja, joista virheet ovat vielä löydettävissä eikä korreloivia laskennallisia havaintoja.



Kuva 3. Tähtäyssäteiden ja kuvitellun kuvatason välinen yhteys. (KÄRKÄS, 1992)

3 JÄRJESTELMÄN ORIENTOINTI

Ennen varsinaista kohteen mittausta teodoliitit orientoitetaan absoluuttisesti ja suhteellisesti. Absoluuttisella orientoinnilla määritetään teodoliittien välisen

kannan b pituus ja niiden akselien leikkauspisteiden välinen korkeusero dh. Suhteellisella orientoinnilla saadaan teodoliittien vaakakehille yhteinen nollasuunta.

TMS-järjestelmä tarjoaa päävalikossaan mahdollisuuden ohjattuun kahden aseman orientointiin. Orientoinnin voi suorittaa myös omien, kuhunkin työhön parhaiten soveltuvien rutiinien mukaan. Kohdepisteiden mittaaminen orientoimattomalla systeemillä on myös mahdollista, jolloin orientointi tehdään jälkikäteen, mitattuihin pisteisiin perustuen sädekimpputasoituksella (TMS MANUAL, 1990).

3.1 Ohjattu kahden teodoliitin orientointi

Ohjattu orientointi alkaa teodoliittien tarkalla elektronisella tasauksella. Elektroninen taseus suoritetaan tietokoneen näytön ohjeiden mukaisesti niin, että kokeen kallistus on korkeintaan 1 mgon.

Pystyakselin määrittämisessä lukitaan kaukoputki arvioituun vaakatasoon ja pyöritetään teodoliittia sata gonia kerrallaan, kussakin kohdassa pystyakselin kallistus rekisteröidään. Wildin kojeissa T2002, T3000 ja T3000A pystyakselin määrittäminen tapahtuu automaattisesti.

Suhteellisen orientoinnin eli yhteisen nollasuunnan määrittämisen teodoliittien vaakakehille, manuaali suosittelee tehtäväksi tähtäämällä johonkin mitattavan kohteen ulkopuolella olevaan kiinteään pisteeseen. Näin teodoliittiaseman stabiilius voidaan tarkistaa aina tarvittaessa. Määrittäminen voidaan valita tehtäväksi tarkasti, jolloin käytetään teodoliitin I ja II asentoa, tai se voidaan tehdä vain I asennossa.

Paras tapa suorittaa suhteellinen orientointi on käyttää autokollimaatioperiaatetta. Äärettömyyteen fokusoidut kaukoputkien viivaristikot kohdistetaan -

autokollimoidaan. Lisäksi fokusoidaan teodoliittien puoleen väliin ja mitataan kollimoinnin jäännösvirhe (SANTALA, 1988). On myös mahdollista suorittaa suhteellinen orientointi tähtäämällä teodoliiteilla toisiinsa käyttäen kaukoputkeen erikseen kiinnitettyjä tähyksiä. Tällaisessa tapauksessa on käytettävä molempia kojeasentoja, jotta tähysten epäkeskisyys tähtäysakselin suhteen eliminoituu (OLLILA, 1989).

Mittatankomittauksella saadaan koordinaatistoon mitta-kaava, eli voidaan määrittää kannan b pituus ja teodoliittien välinen korkeusero dh . Mitä useampia mittatankoja käytetään ja mitä useammassa paikassa niitä mitataan sitä tarkempi on tulos. Mittatangon pituuden määrittämistä varten on ohjelmaan mahdollista tallentaa kahdeksan eri mittatangon kalibrointitiedot: pituus, pituuden keskivirhe, lämpölaajeneminen ja kalibrointi-lämpötila. Ennen mittatangon mittaamista tietokoneeseen syötetään vallitseva lämpötila, jotta tangon lämpölaajeneminen tulee huomioon otetuksi. Havainnot suoritetaan kolmiulotteisesti, jolloin niistä voidaan samanaikaisesti määrittää kannan pituus ja teodoliittien korkeusero. Mittatankomittauksessa sarjahavainnot ovat mahdollisia, jolloin tangon pituus määräytyy keskiarvona.

Edellisten orientointihavaintojen lisäksi on mahdollista mitata tukipisteitä, joille koordinaattiarvot jo tunnetaan. Nämä ovat tavallisia kohdetilassa olevia pisteitä, joille on aikaisemmilla mittauksilla määritetty koordinaatit tai joiden sijainti muuten tunnetaan. Tukipistetiedot tallennetaan erilliseen tukipistetiedostoon, mistä ne voidaan myöhemmissä orientoinneissa aina uudelleen hakea.

Kaikkien haluttujen tukipisteiden mittausten jälkeen voidaan laskea orientoinnin ratkaisu. Orientointi ilman tukipisteitä on myös mahdollista. Ohjelma ilmoittaa orientoinnin onnistumisesta tai epäonnistumisesta.

Epäonnistuneessa tapauksessa ohjelma ilmoittaa rutiinit, joissa havainnot on uusittava.

Useamman teodoliitin systeemin ollessa kyseessä lisätään teodoliitit yksi kerrallaan jo orientoituun kahden teodoliitin järjestelmään kollimointihavainnoilla tai yhteisiä pisteitä havaitsemalla.

3.2 Vapaa orientointi

ManCAT-ohjelma sallii orientoinnin suorittamisen myös kunkin käyttäjän omilla menetelmillä. Orientointi perustuu kolmeen tunnusmerkkiin: kollimointiin, mittatankomittauksiin ja tukipistemittauksiin. Näistä kaksi ensimmäistä ovat välttämättömiä. Parasta mahdollista tulosta tavoiteltaessa myös tukipistemittauksia tulee tehdä.

Käytännössä on esiintynyt vaikeuksia orientoida systeemiä muuten kuin ohjatulla orientoinnilla. Esimerkiksi, jos teodoliitit on pystytetty tunnetuille pisteille, tulisi kanta pystyä määrittämään tätä kautta, mutta järjestelmä vaatii aina myös mittatankomittaukset.

4 MITTAAMINEN

Ennen varsinaisen mittaamisen aloittamista pystytetään kalusto etukäteen suunnitellulle paikalle. Varsinkin teodoliittien kolmijalkojen stabiilius on varmistettava. Virran kytkeminen systeemiin on tehtävä järjestyksessä: tietokone, tiedonsiirtoyksiköt (GIF) ja viimeksi teodoliitit. Virran sammuttaminen on tehtävä vastaavasti käänteisessä järjestyksessä. Virheellisillä sähkökytkennöillä voidaan saada aikaan pahoja elektronisia vaurioita.

Työn nimi ja parametrit on määriteltävä ManCAT-ohjelmalle ennen muita toimenpiteitä. Määriteltäviä paramet-

reja ovat mittayksiköt, koordinaatisto, eri toleranssit ja niiden hälytysrajat, kantalatat, käytettävät teodoliitit ja sarjaportit, joihin kojeet on kytketty.

4.1 Mittauksen suunnittelu

Tärkeä osa EPLA-järjestelmällä mittausta on mittauksien suunnittelu. Aluksi on määriteltävä mitattava kohde, mittauslaji, tarkkuusvaatimukset ja toistomittausten aikaväli. Mittauslaji voi olla tarkistus-, asennus- tai deformaatiomittaus. Kohteet ovat usein suuria eikä niitä saada mitattua yhdeltä teodoliittiparin muodostamalta kannalta. On kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, että mittausgeometria pysyy hyvänä. Kannoille on mitattava riittävästi yhteisiä tukipisteitä, joilla ne sidotaan toisiinsa. Koska kantojen liittäminen lisää mittauksen epävarmuutta, tulisi niiden lukumäärä minimoida, mittausgeometria huomioonottaen.

Valmistajan mukaan mittausgeometrian kannalta ideaalisin kohdepisteen paikka on kannan kolmanneksen päässä kannan keskipisteestä sekä tähtäyssäteiden leikkauskulman tulee olla 78-142 astetta. Jokaisen kohdepisteen kohdalla pyritään siihen, että ne ovat alle kannan pituuden etäisyydellä teodoliiteista ja että leikkauskulma on 60-150 astetta. Lisäksi kohdepisteiden tulisi sijaita niin, että pisteen kohtisuora projektiopiste kannalle sijaitsis teodoliittien välissä. Suunnittelua joudutaan tekemään myös mittauspaikalla, koska geometrian hahmotus pelkistä piirustuksista on vaikeaa.

4.2 Yhdeltä kannalta mittaaminen

Itse kohdepisteiden mittaus tapahtuu kohdistamalla kaikki järjestelmän teodoliitit samanaikaisesti samaan pisteeseen. Kohteita voidaan mitata tähtäämällä niissä jo oleviin tarkasti identifioitaviin pisteisiin, kuten

teräviin sauma- ja nurkkapisteisiin. Yleensä kuitenkin käytetään keinotekoisia tähysmerkkejä, joko pakkokeskistettyjä tähyksiä tai liimattavia tarratähyksiä. Näin varmistetaan, että teodoliiteilla tähdätään tarkasti samaan pisteeseen. Kohteen näkyvöittäminen toiseen teodoliittiin kiinnitetyllä laservalolähettimellä on myös mahdollista, mutta näin ei päästä parhaaseen mahdolliseen tarkkuuteen. Samanaikaisilla tähtäyksillä estetään kohteen liikkumisen vaikutus mittaukselle.

Kulmahavainnot voidaan tehdä sarjahavaintoina niin, että laskentaan käytetään keskiarvoa 1-99 havainnosta. Lukumäärä voidaan valita tilanteen mukaan. Useamman teodoliitin systeemissä voidaan erikseen määritellä teodoliitit, joiden havaintoja käytetään pisteen koordinaattien laskennassa.

Erillisenä toimintona mittausvalikossa on pultin reiän, tähyksen paksuuden ja piilopisteen mittaus. Pultin reiän mittauksella tarkoitetaan ympyrän muotoisen kohteen mittauksella, josta reiän keskikohdan sijaan määritellään reunojen sijainti. Tähyksen paksuudella voidaan määrittää mitatun pisteen kohtisuora etäisyys valitusta tasosta, esim. xy-tasosta. Toiminnolla voidaan määrittää myös tähyksen etäisyys jostakin määritellystä muodosta (kts. luku 5.1). Piilopistetankomittauksella tarkoitetaan pisteiden mittauksella, jotka eivät näy kaikille teodoliiteille. Näiden mittaus on mahdollista niin, että aluksi mitataan kaikilla kojeilla pisteelle asetettuun tunnetun mittatangon tähyksiin, jonka jälkeen piilopisteen koordinaatit voidaan määrittää kun tangon pituus ja suunta tunnetaan. Piilopisteiden mittaus on mahdollista vain etukäteen orientoidulla systeemillä.

Pisteitä mitattaessa on tietokoneen näytöllä kuvan 4 mukaiset tiedot. Näytön yläosassa on määrittelytietoja, kuten työn nimi ja koordinaattisysteemi. Keskiosassa näyttöä on pisteen tunnus, joka voi koostua sekä kirjaimista että numeroista, sen alla pisteelle lasketut

koordinaatit, koordinaattien keskivirheet ja tähtäysvirhe. Luvut ilmoitetaan määritellyissä yksiköissä, tässä on käytössä tuumat (IN). Tähtäysvirhe on tähtäys säteiden leikkauspisteen ja pisteen lasketun sijainnin välinen ero kulmayksiköissä.

WILD LEITZ

ManCAT

Jobname : TEST01	Coordinate System: BASE RHR
Point protect: OFF	Printer level: FULL
POINT	ID: BOLT02
X	-0.200 SD: 0.00100 IN
Y	1.649 SD: 0.00117 IN
Z	-0.003 SD: 0.00089 IN
ESC=EXIT	Pointing Error: .020
1.Read all stations	6.Output/operating parameter
2.Read selected stations	7.Measurement features
3.Average readings	8.Target thickness
4.Input alpha portion	9.Orientation features
5.Orientation/Solution	0.Return to previous menu

Kuva 4. Näyttö mittaustuloksille. (TMS MANUAL, 1990).

4.3 Suurten kohteiden mittaaminen

Käytettäessä kahta teodoliittia ei kohdetta useinkaan saada mitattua kokonaan yhdeltä kannalta. Toista tai molempia teodoliitteja joudutaan siirtämään, jopa useita kertoja. Jotta mittaustuloksia voitaisiin loogisesti käsitellä, on kaikkien kantojen muodostamat koordinaatit yhdistettävä. Sopivalla muunnoksella muunnetaan kaikkien kohdepisteiden koordinaatit samaan koordinaatistoon. Koordinaatistiksi on mahdollista valita mikä tahansa koordinaatisto, esim. kohteen sisäinen koordinaatisto. ManCAT-ohjelmistossa koordinaatisto voi olla oikea- tai vasenkätinen suorakulmainen koordinaatisto tai myötä- tai vastapäiväinen sylinteri- tai pallokoordinaatisto. Yleensä useampien kantojen tapauk-

sessä koordinaatit muunnetaan ensimmäisen kannan määrittämään peruskoordinaatistoon.

TMS-manuaali ei käsittele lainkaan kahden teodoliitin muodostamien kantojen yhdistämistä toisiinsa. ManCAT-ohjelmistossa on kuitenkin ohjelma koordinaatiston määrittelyyn, jolla eri kannoissa tehdyt mittaukset voidaan muuntaa samaan koordinaatistoon. Koordinaatistovalikossa on neljä vaihtoehtoa muunnoksen tekemiseen: mittakaavakerroin, akselien kierrot, origon siirto sekä pienimmän neliösumman (PNS) menetelmä, joka sisältää kaikki edelliset. Kantojen yhdistäminen perustuu työtiedostossa olevien mitattujen pisteiden ja valitussa vertaustiedostossa olevien samojen pisteiden koordinaatteihin. Muunnoksen tarkkuus riippuu pisteiden koordinaattien tarkkuudesta molemmissa koordinaatistoissa.

Valittaessa koordinaatistovalikosta PNS-menetelmä on ennen muunnoksen suorittamista annettava vertaustiedoston nimi ja valittava ns. kontrollipisteet, joita muunnoksessa käytetään. Pisteitä valitaan kattavasti eri tasoilta ja eri puolilta kantaa. Minimissään valitaan 5-7 pistettä, mutta jos vain mahdollista valitaan useampi piste. Muunnoksessa on 7 tuntematonta ja ylimääräisiä havaintoja on oltava riittävästi. Koska työ- ja vertaustiedostopisteiden tunnusten tulee vastata toisiinsa, on numeroinnissa ja kirjaintunnusten käytössä oltava huolellinen. Onnistuneen muunnoksen jälkeen saadaan ratkaisuparametrit: origo, kierrot ja mittakaavakerroin. Kustakin muunnetusta pisteestä näytölle tulostuu pisteen kolme koordinaattia muunnoksen jälkeen, sen alkuperäiset koordinaatit työ- ja vertaustiedostoissa ja vertauskoordinaattien ja uusien muunnettujen koordinaattien erotus.

5 TULOSTEN TULKINTA

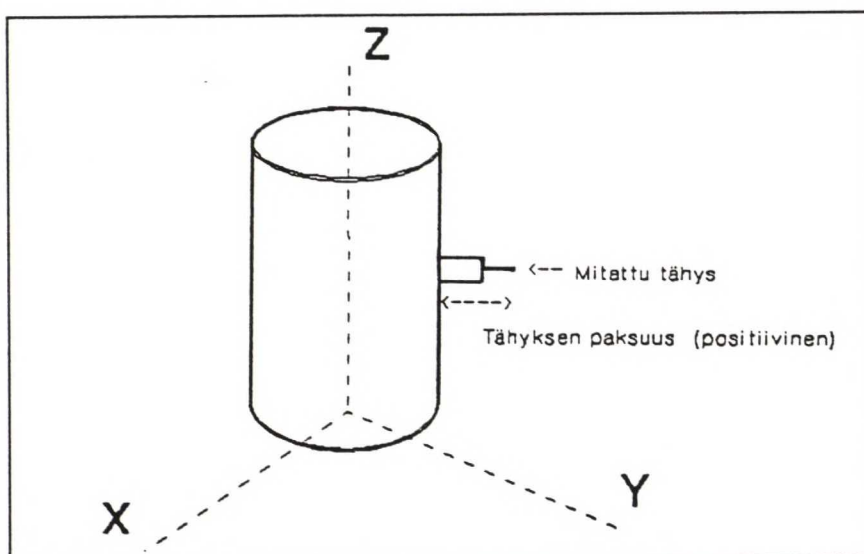
Kun kohdepisteistö on mitattu, siirrytään ohjelmistossa tulosten tulkintaosaan. Tulkintaosa jakaantuu kahteen osaan: muodon sovitukseen ja analyysieihin. Muodon sovituksella tarkoitetaan geometrisen muodon sovittamista valittuun pistejoukkoon. Analyysiohjelmalla voidaan laskea muodostettujen muotojen tai pisteiden välisiä suhteita, kuten kulmaa, etäisyyttä tai leikkausta. Tulosten tulkinnessa olisi tärkeää pystyä tarkastelemaan muotoja ja analyysiejä graafisesti. Paitsi että kuvat ovat havainnollisia, voidaan kuvilta osoittamalla välttää väärinkäsityksiä, esim. mitä etäisyyttä tai kulmaa tarkoitetaan.

5.1 Muodon sovittaminen

Ohjelmassa on valittavissa seitsemän geometrinen muotoa: suora, taso, ympyrä, sylinteri, paraboloidi, pallo ja kartio. Alkutoimenpiteisiin liittyy muodon valinta ja nimeäminen sekä sovittamiseen käytettävien pisteiden valinta. Ohjelma käyttää muodon sovittamiseen samankaltaista iteratiivista pienimmän neliösumman menetelmää kuin koordinaatistomuunnoksessakin. Ohjelma lopettaa laskennan kun iterointikierroksia on läpikäyty kymmenen tai kun keskivirhe muuttuu edellisestä kierroksesta vähemmän kuin kymmenen prosenttia. Jos keskivirhe ja sen muutos eivät suppenekaan iterointikierroilla, ei valittua muotoa pystytä sovittamaan annettuun pisteistöön.

Yksi ohjelman osa on kappaleen koon määrittäminen. Tässä valikkomahdollisuudessa voidaan muuttaa kappaleen kokoa määrittävän parametrin arvoa. Ympyrälle ja pallolle koon parametri on säde, sylinterille se on akseli ja paraboloidille polttopisteen paikka. Suoralle ja tasolle kokoparametria ei voida määrittää.

Toinen muodon sovituksen alla olevasta valikosta löytyvä kappaleen määrittämiseen liittyvä osa on tähyksen paksuuden määrittäminen, jota käsiteltiin myös kappaleessa 4.2. Tähyksen paksuus on muodon sovituksessa määritelty eri tavoilla riippuen käsiteltävästä muodosta. Jos on kyse tasosta tai ympyrästä, tähyksen paksuuden suunta on kohtisuora Z-akselista ja se on positiivinen, jos tähys nousee tasolle positiivisen Z-akselin puolelle. Sylinterissä ja pallossa ilmoitetaan paksuuden arvo negatiivisena muodon sisällä ja positiivisena muodon ulkopuolella (kts. kuva 5). Paraboloidilla arvo on negatiivinen, jos tähys on polttopisteen puolella. Suoralle tähyksen paksuutta ei voida määrittää.



Kuva 5. Tähyksen paksuus sylinterissä. (TMS MANUAL, 1990).

Kun muodon sovitus on suoritettu, voidaan tarkastella kuinka paljon käytetyt pisteet poikkeavat määritellystä muodosta. Myös pisteet, joita ei käytetty sovittamiseen voidaan nyt lisätä joukkoon ja tarkastella niiden poikkeamia muodosta. Ohjelma näyttää listan pisteistä, niiden kokonaispoikkeamasta ja poikkeamasta kunkin koordinaattiakselin suhteen. Haluttaessa ohjelma tulostaa myös listan ratkaisuparametreista, joita ovat kappaleen koordinaatiston origo, muodon sovituksen yh-

teydessä tehdyt koordinaatiston kierrot ja mittakaava-kerroin. Parametrien arvot ilmoitetaan suhteessa kulloinkin määritelttyyn koordinaatistoon, joka yleensä on peruskoordinaatisto.

5.2 Muotojen määrittely

Kaikkien muotojen sovituksen jälkeen näytölle tulostuu ratkaisuselostus, jossa on ilmoitettu keskivirhe ennen tasoitusta, keskivirhe seuraavalla kierroksella ja muutosprosentti edelliseen verrattuna, tunnettujen ja tuntemattomien parametrien lukumäärä sekä vapausasteet.

Suoran sovittamiseen tarvitaan vähintään kaksi pistettä. Poikkeamat tulostetaan piste pisteeltä ilmoittamalla pisteen ja suoran välisen normaalin komponentit kunkin koordinaattiakselin suhteen. Tason sovittamiseen vaaditaan vähintään kolme pistettä. Poikkeamat ovat etäisyyksiä tasosta Y-akselin suunnassa.

Ympyrän sovittamiseen tarvitaan vähintään kolme pistettä ympyrän kehältä. Poikkeamatulostuksessa on pisteittäin normaalien kokonaispoikkeamien ja poikkeamien kunkin akselin suhteen lisäksi poikkeamat ympyrän tasosta Y-akselin suunnassa.

Sylinterin sovittamisen vaatimuksena on vähintään viisi pistettä. Poikkeamat kuvaavat sylinterin tapauksessa kuinka paljon piste poikkeaa sylinterin pinnalta ympyrän sädettä pitkin. Poikkeama on positiivinen, jos piste jää sylinterin ulkopuolelle ja negatiivinen sisäpuolella. Valittaessa sylinteriä määrittäviä pisteitä ensimmäinen piste määrittää origon sylinterin sisälle ja X-akselin suunnan. Toinen piste määrittää millä puolella Y-akselia sylinteri on. Kolmen ensimmäisen pisteen tulisi yhdessä määrittää ympyrä, joka muodostaa sylinterin pohjan.

Paraboloidia määritettäessä tarvitaan vähintään kuusi pistettä. Ensimmäiset kolme määrittävät paraboloidin ympyräreunan. Neljän seuraavan pisteen tulisi sijaita lähellä paraboloidin pintaa ja ne eivät saa olla kolmen pisteen määrittämällä ympyrällä. Ensimmäinen muotoa määrittävä piste ilmoittaa myös positiivisen X-akselin suunnan. Paraboloidin polttopiste sijaitsee Z-akselilla.

Pallon sovittamiseen tarvitaan minimissään neljä pistettä. Määrittävät pisteet eivät saa sijaita kaikki samassa ympyrätasossa. Poikkeamat ilmoittavat kuinka kaukana pallon sisä- tai ulkopuolella piste on pinnasta säteen suunnassa. Kappaleen koordinaatiston origo on pallon keskipisteessä. Koordinaatiston kierrot eivät pallon tapauksessa ole mahdollisia.

Kartion määrittämiseen vaaditaan vähintään kuusi pistettä. Kartion origo on sen huipussa. Ensimmäinen määrittävä piste ilmoittaa positiivisen X-akselin suunnan ja toinen piste positiivisen Y-akselin suunnan. Ensimmäiset kolme pistettä määrittävät pohjaympyrän. Neljännen pisteen tulisi sijaita lähellä halutun kartion huippua.

5.3 Analyysit

Tässä ohjelman osassa tehtyjä mittauksia ja laskettuja muotoja on mahdollisuus analysoida. Keinoina ovat etäisyyden ja kulman määrittäminen, suoran jakaminen sekä mahdollisuus muodostaa kappaleita, jotka leikkaavat tai ovat kohtisuorassa tai samansuuntaisina aikaisemmin muodostettuihin kappaleisiin nähden. Myös pistejoukkojen vertailu käyttäjän asettamissa toleranssirajoissa on mahdollista.

Ensimmäisenä vaihtoehtona analyysivalikossa on pistejoukkojen vertailu. Mahdollisuutena on vertailla sen

hetkistä työtiedostoa ja valittua ASCII-muotoista vertailutiedostoa. Ohjelma hakee samoja pisteitä pistetunnuksien avulla. Vertailun tuloksena saadaan kummallekin tiedostolle yhteiset pisteet ja niiden koordinaattien erotukset.

Etäisyyttä voidaan määrittää kahden pisteen välille, pisteen ja kappaleen välille tai kahden kappaleen välille. Kappaleille etäisyys voidaan laskea joko kappaleen akseliin tai sen pintaan. Pisteen ja kappaleen välinen etäisyys on niiden kohtisuora etäisyys, kappaleiden välillä se on lyhyin mahdollinen etäisyys. Kahden tason ja tason ja kappaleen akselin välisen etäisyyden lisäksi ohjelma laskee niiden leikkauskohdan. Tätä varten käyttäjän on määriteltävä toleranssikulma, minkä rajoissa leikkauskohtaa etsitään. Oletusarvona ohjelma pitää toleranssikulmaa 0.3 astetta, tätä ja pienemmässä kulmassa olevat kappaleet se katsoo saman suuntaisiksi, joille leikkausta ei voida laskea.

Kolmantena vaihtoehtona valikossa on suoran jakaminen. Siinä käyttäjä antaa kaksi pistettä, suoran päätepisteet, jonka jälkeen määritellään suoralle välipisteiden lukumäärä ja pistetunnukset niille. Ohjelma jakaa suoran lukumäärän osoittamaan tasavälisiin osiin.

Analysoitaessa mittauksia kulmien avulla, ohjelma tarjoaa kolme vaihtoehtoa: kahden pistejoukon muodostamien vektorien välinen kulma, kahden kappaleen z-akselien välinen kulma sekä kappaleen Z-akselin ja jonkun koordinaattitason, esim. XY-taso välinen kulma. Kulman avulla analysointiin liittyy myös kahden pisteen analyysi. Tässä analyysissä käyttäjä valitsee kaksi pistettä työtiedostosta, joiden väliin jäävän vektorin ohjelma analysoi. Tuloksina saadaan vektorin pituus ja sen kolme komponenttia, x, y, z, vektorin projektiot kaikille koordinaattitasoille, xy, yz, zx, sekä kulmia eri tasojen ja akselien välillä.

Seuraava vaihtoehto valikossa on puolittaja, joka las-

kee pisteiden tai muotojen välisiä puolituspisteitä, -suoria tai -tasoja.

Kuudennessa valikkomahdollisuudessa määritetään kohtisuora pisteen ja kappaleen välille tai kahden kappaleen välille. Tuloksena ilmoitetaan janan lähtöpiste ja sen pituus. Lähtöpisteellä ei tässä tarkoiteta suoran alkupistettä vaan pistettä kohtisuoralla, jota ohjelma käyttää origona laskiessaan suoran tai kappaleen tarkkaa sijaintia koordinaatistossa. Ohjelma asettaa lähtöpisteen aina käsiteltävän kappaleen origoon.

Valikossa seuraavana on yhdensuuntaisen suoran tai tason määrittäminen. Ohjelma laskee halutulle suoralle tai tasolle yhdensuuntaisen suoran tai tason käyttäjän määrittelemän pisteen kautta.

Kahdeksas vaihtoehto on leikkauksen laskeminen. Leikkaus on kahden työtiedostossa olevan minkä tahansa kappaleen leikkauskohta. Leikkaus voi olla piste, suora tai taso.

Analyysivalikon yhdeksännessä kohdassa käyttäjä voi määritellä asetuksia, jotka määrittävät tarkkuuksia ja toleransseja. Näitä parametreja ovat suurin kohdistusvirhe, pienin tähtäyskulma, yhdensuuntaisuustoleranssi, leikkauksen toleranssi (vrt. etäisyyden määrittäysanalyysi) sekä suurin suhteellinen toleranssi mitattujen ja syötettyjen arvojen välillä.

6 TARKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

EPLA-mittauksen epävarmuus on parhaimmillaan 0,02 millimetriä (SANTALA, 1988). Sekuntiteodoliitteja käytettäessä menetelmän epävarmuus on $5 \cdot D \cdot 10^{-6}$ m ja milligooniteodoliitteja käytettäessä $1 \cdot D \cdot 10^{-5}$ m, missä D on kohteen etäisyys metreinä (KAARTINEN, 1992). Tietyn laitteiston tarkkuus optimiolosuhteissa voidaan määrit-

tää, mutta jokaisessa todellisessa mittaustilanteessa joudutaan mittaamaan pisteitä huonon geometrian alueelta tai hieman arveluttavissa olosuhteissa. Viime kädessä kunkin mittaustyön tarkkuus voidaan kertoa vasta mittaustilanteen jälkeen, kun tunnetaan olosuhteet.

6.1 Laskentamenetelmä

Laskentamenetelmän tulee ehdottomasti olla aidon kolmiulotteisesti ratkaistu. Lisäksi tarkkuuteen vaikuttaa mitä tekijöitä laskentamalli ottaa huomioon.

Käytännössä jokaisella asemapisteellä on oma paikallinen tähtitieteellinen koordinaatistonsa, missä z-akseli yhtyy luotiviivan suuntaan. Luotiviivojen erisuuntaisuudesta johtuen teodoliittiparin pystyakselit eivät ole yhdensuuntaiset. Maan kaarevuuden vaikutus teodoliittien vaakatasojen eroon 10 metrin matkalla on 0,1 mgon. Lisäksi tulee luotiviivojen vaikutus, jota on vaikea määrittää. Jos kannan pituus on alle 5 metriä, on luotiviivan vaikutus pienempi kuin teodoliittien erotuskyky, eikä sitä silloin tarvitse ottaa laskuissa huomioon. Pitemmiltä kannoilta mitattaessa on luotiviivan vaikutus eliminoitava joko havaintoihin liitettävällä korjaustermillä tai tasoitusalgoritmeilla (**MARTIKAINEN, 1988**). Jos mitattava kappale on ulottuvuudeltaan kymmeniä metrejä, aiheuttaa luotiviivan suunnan muutos merkitsevää virhettä pystykulmiin. Mittauskoordinaatisto ja näin olen luotiviiva on hyvä sitoa peruskoordinaatistoon eli ensimmäisen kojeaseman koordinaatistoon. Muilta kojeasemilta mitatut kulmat voidaan muuttaa ensimmäisen kojeaseman luotiviivan mukaisiksi pallotrigonometrian kaavoilla (**HRADILEK, 1984; OLLILA, 1989**)

$$\cos z = \cos z^m \cdot \cos \delta - \sin z^m \cdot \cos \alpha^m \cdot \sin \delta \quad (6.1)$$

$$\cot \alpha = \cot \alpha^m \cdot \cos \delta + (\cot z^m \cdot \sin \delta) / \sin \alpha^m, \quad (6.2)$$

missä $\sin \alpha^m \neq 0$,

z on muunnettu pystykulma,

z^m on mitattu pystykulma,

α on muunnettu vaakakulma,

α^m on mitattu vaakakulma ja

δ on pallon keskuskulma, joka saadaan jakamalla teodoliittien välisen kannan pituus maapallon säteellä.

Refraktiolla tarkoitetaan tähtäyssäteiden taipumista sen lävistäessä ilmassoja, joilla on eri lämpötilat. Refraktation vaikutus mittauksiin voitaisiin mallintaa, mutta yleensä se sivuutetaan mallin monimutkaisuuden ja epävarmuuden vuoksi. Refraktation vaikutusta voidaan minimoida mittausajankohdan ja -paikan valinnalla.

6.2 Kalusto

Kalustolla tarkoitetaan kaikkea mittaustilanteessa käytössä olevaa kalustoa: teodoliitteja ja niiden jalustoja, mittakaavatankoa, tähyksiä ja tietokonetta ohjelmiseen.

Teodoliitin tarkkuus on sen alkuperäinen määrityskalibroinnissa saatu tarkkuus sekä myöhempien seurantakalibrointien ilmoittama tarkkuus ja mahdolliset korjaukset. TMS-järjestelmässä käytettävien Wildin teodoliittien valmistajan ilmoittama kulmanlukutarkkuus on sekuntiteodoliiteille, joissa on absoluuttinen kulmanlukumenetelmä, 0,1 mgon. Teodoliittien akselit ja kehät tulee tarkistaa riittävän usein kollimaattorissa tehdyissä kalibroinneissa. Aina kun mahdollista, on teodoliitin akselivirheet pyrittävä eliminoimaan mittausmenettelyllä.

Käytettäessä teodoliittien alla normaaleja maastomittausjalustoja, on otettava huomioon niiden mahdollinen painuminen. Uudet elektroniset teodoliitit ovat huomattavasti

tavan raskaita, mutta jos pystytyksen jälkeen annetaan kojeiden jonkin aikaa levätä jalustoillaan, on painumisen mittauksen aikana vähäisempää.

Mittakaavatangon pituus on määritettävä $1...3 \cdot 10^{-6}$ m tarkkuudella, koska siitä johdetaan mittakaava koko mittaukselle. Mittakaavatangon pituus on määritettävä laserinterferometrillä ja tarkastettava määrääjoin kalibroinneilla lattakomparaattorissa. Mittatanko on valmistettava mahdollisimman stabiilista materiaalista ja sen lämpö- ja kosteusmuutokset on tunnettava ja otettava huomioon. TMS-järjestelmään syötetään tangon pituus ja kalibrintilämpötila ja laskennassa se ottaa huomioon mahdollisen lämpölaajenemisen mittauslämpötilassa. Kosteuden aiheuttamat muutokset voivat myös olla huomion arvoisia. TKK:ssa on käytössä hiilikuituinen mittatanko, jonka lämpölaajeneminen on pienempi kuin invarin, mutta kosteuden sille aiheuttamat muutokset ovat vielä tutkimatta.

Käytettävät tähykset, sekä teodoliiteissa suhteellisesti orientoitaessa että kohteessa olevat, vaikuttavat mittauksentarkkuuteen. Jos on tarkoitus mitata vain kohdetta yleensä eikä etukäteen määritettyjä tiettyjä pisteitä, ovat tarrakiinnitteiset tähykset hyviä. Tähyksessä on tärkeä, että se näkyy hyvin eri suuntiin ja etäisyyksille, kuviointina käytetään yleensä sisäkkäisiä ympyröitä tai ristikuviota. TMS-järjestelmässä voidaan määritellä myös tähyksen paksuus, jolloin tarran paksuus ei vaikuta mittauksentulokseen. Joissakin tapauksissa on mahdollisuus mitata kohteen luonnollisia pisteitä, kuten saumoja ja nurkkia, mutta tällaisissa tapauksissa on aina varmistettava, että kaikki teodoliitit tähtäävät yksiselitteisen samaan paikkaan. Jos tähyys on kohdistettava johonkin tiettyyn kohteen pisteeseen, käytetään tarratähyksen sijasta kartiomallista tähystä, joka voidaan kärkeänsä avulla kohdistaa tarkasti. Tässä on ongelmana tähyksen stabiilius mittauksen aikana. Myös lasersädeä voidaan käyttää kohteen näky-

vöittämiseen kuten luvussa 4.2 kerrottiin, mutta sen tarkkuus ei ole paras mahdollinen.

6.3 Mittaustilanne

Mittaustilanteella tarkoitetaan kojeiden ja kohdepisteiden keskinäistä sijoittumista sekä ympäristöä, missä mittaus tapahtuu. Mittaustarkkuuteen vaikuttavat kannan pituus ja hyvin voimakkaasti mittausgeometria. Mittausgeometrian tärkeimmät tekijät ovat mittauskulma, eli tähtäyssäteiden leikkauskulma pisteessä, pisteen kohtisuora etäisyys kannalta tai sen jatkeelta sekä kannan pituus. Mittausgeometriaa on käsitelty enemmän luvussa 4.1 Mittauksen suunnittelu. Mittausympäristöt teollisuusmittauksissa ovat vaihtelevia. Kaikki mahdolliset tarkkuuteen vaikuttavat tekijät on pyrittävä ottamaan huomioon etukäteen ja mahdollisesti välttämään tai poistamaan. Suuria lämpötilavaihteluja mittauksen aikana on vältettävä samoin kuin raskaita kohteita käsitellessä niiden liikuttelua samalla alustalla, jolle teodoliitit on pystytetty ja orientoitu.

7 JÄRJESTELMÄN TESTAAMINEN

EPLA-periaatteella toimivien järjestelmien kalibrointi on tähän mennessä jäänyt sen erillisten yksiköiden, lähinnä kantalatan ja teodoliittien kalibrointiin. Laskentaohjelman ja koko järjestelmän yhteinen kalibrointimahdollisuus on puuttunut. Valmistajat eivät anna tarkkaa tietoa siitä, miten ohjelmat ratkaisevat niille annetut laskutehtävät. Tästä syntyy tilanne, missä käytössä on järjestelmä, jonka toimintaa ja tarkkuutta ei tunneta erilaisissa tilanteissa. Näin voidaan saada aikaan virheellisiä mittaustuloksia ja näin aiheuttaa kalliita erehdyksiä.

7.1 Mittaukset

Leican TMS, ManCAT-järjestelmällä tehtiin testimittauksia kahden päivän aikana Teknillisen Korkeakoulun geodesian ja kartografian laboratorion kojosalissa. Kalustona oli Wildin T2000 teodoliitit, Datamini PA-20 Laptop kannettava mikrotietokone sekä mittakaavatankona geodesian laboratoriossa valmistettu hiilikuituinen kolmireikäinen mittatanko. Kolmireikäisen tangon kahden uloimman reiän välinen etäisyys laserinterferometrillä määritettynä on 1,300289 m. Mittauksissa havaittiin kojosalin seiniin ja kattoon kiinnitettyihin tarratähyksiin. Kohdepisteitä oli yhteensä 36 kappaletta. Kuvassa 6 on esitetty käytetyn tarratähyksen kuva.

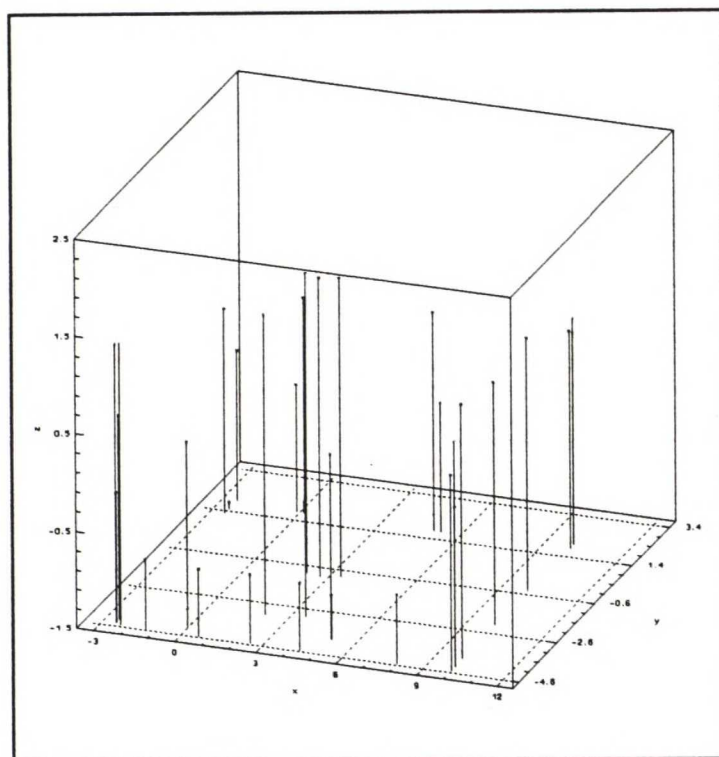


Kuva 6. Mittauksissa käytetty tähysmalli.

Teodoliitit oli aina pystytetty kojosalin lattiassa oleville betonisille havaintoalustoille normaalien maastomittauskolmijalkojen päälle. Mittauksissa molemmissa teodoliiteissa oli oma havaitsijansa, jolloin havainnot pystyttiin tekemään mahdollisimman samanaikaisesti. Kattopisteisiin tähtäämisen helpottamiseksi käytettiin kääntyviä okulaareja. Pisteet on ensisijaisesti sijoitettu kantaviin rakenteisiin, niiden liikkumattomuuden varmistamiseksi, mutta myös kattoa on käytetty geometrian parantamiseksi.

Suhteellinen orientointi suoritettiin autokollimointiperiaatteella. Mittakaavan määrittämiseen käytettiin

kolmireikäistä hiilikuitutankoa niin, että se oli pystytetty kolmijalalle tasatulle pakkokeskistysalustalle vaakatasoon mittauskannalle noin teodoliittien puoleenväliin. Kannoilla 2-6 mitattiin orientoinnin ratkaisemiseksi myös edelliseltä kannalta mitattuja kontrollipisteitä, joita aina oli vähintään 10 kappaletta/kanta.

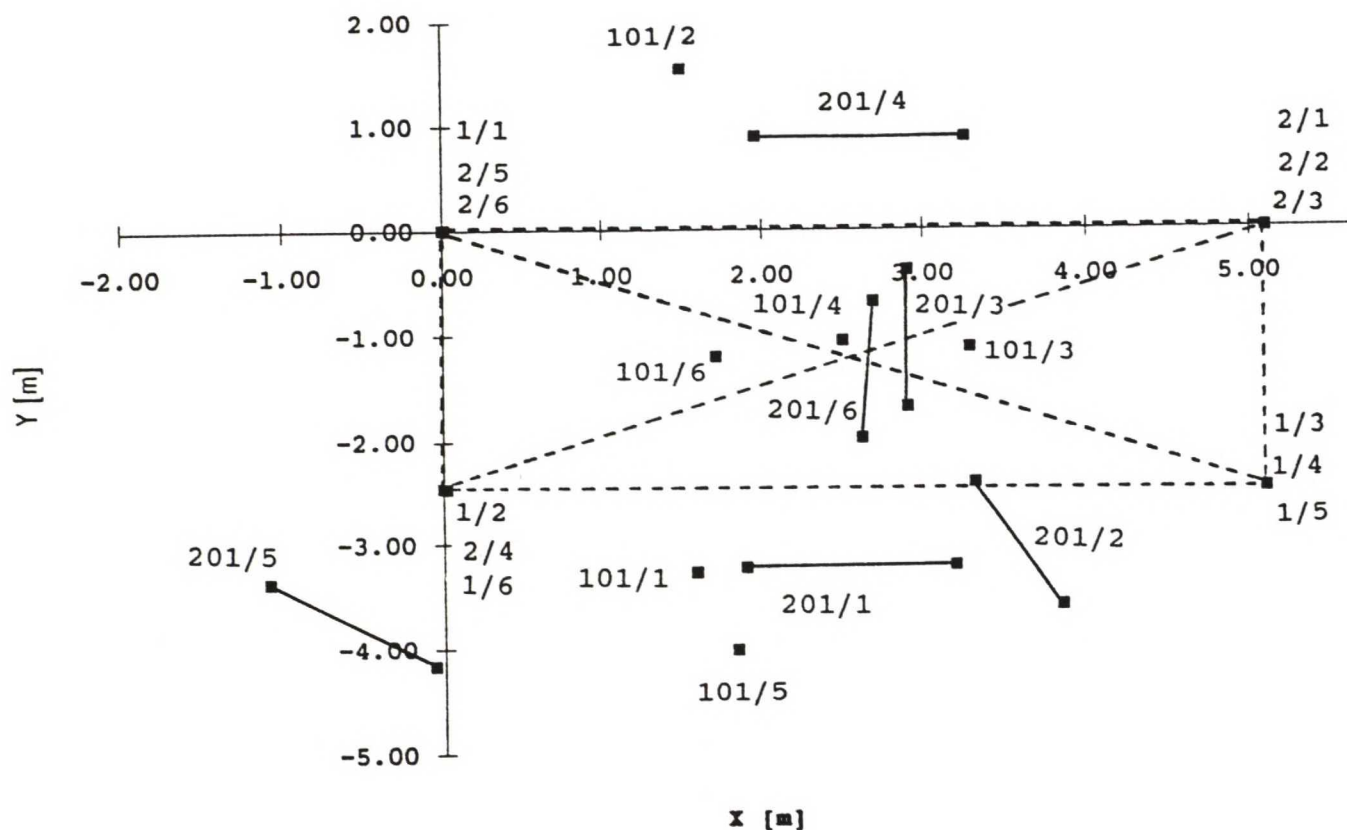


Kuva 7. Mitattujen pisteiden sijoittelu kojosalissa.

Seiniin ja kattoon kiinnitettyjen pisteiden lisäksi jokaiselta kannalta mitattiin kohdetilaan pystytettyihin kahteen mittatankoon. Toinen oli mittakaavan määrittämisessä käytetty vaaka-asentoinen latta, toinen pystyasennossa oleva mittatanko, ns. xyH-latta. Kuvassa 7 on mitattujen kohdepisteiden sijainnit kojosalissa. Koordinaatisto on mittauskoordinaatisto, jonka origo on ensimmäisen teodoliitin akselien leikkauspisteessä.

Pystyasentoisessa mittatangossa on neljä kohdistusmerkkiä, joiden etäisyydet pohjalevystä on määritetty la-

serinterferometrillä. Kuvassa 8 on xy-tasossa esitetty kaikki mittauksissa käytetyt kannat ja kohdetilassa olevien mittatankojen sijainnit kullakin kannalla.



Kuva 8. Teodoliittiasemien sijainnit, käytetyt kannat ja kohdetilassa mitattujen mittatankojen sijainnit.

Kuvan merkintä 1/1 tarkoittaa 1. teodoliittiasema 1. kannalla, 2/1 tarkoittaa 2. teodoliittiasema 1. kannalla jne. Merkintä 101/1 tarkoittaa pystylatan (xyH-latta) alimman merkin mukaan ilmoitettua sijaintia 1. kannalta mitattaessa, merkintä 201/1 ilmoittaa vaakalatan sijainnin 1. kannalta mitattaessa jne.

7.2 Laskenta

Kahden teodoliitin kulmahavaintoihin perustuva koordinaattien laskenta suoritettiin ManCAT-ohjelmalla

niin, että kaikki havainnoista lasketut koordinaatit muunnettiin ensimmäisen kannan määrittämään koordinaatistoon, jonka jälkeen koordinaatit olivat vertailukelpoisia. Järjestelmän tarkkuuden selvittämiseksi laskentatarkastelun kohteena olivat lattahavainnoista lasketut pituudet verrattuna kalibroituihin arvoihin sekä vaakalatan tapauksessa lisäksi kohdetilassa mitattujen tuloksien ero mittakaavan määrittämisessä saatuihin tuloksiin. Kohdepisteiden osalta tarkasteltiin koordinaattieroja eri kannoilla mitatuissa tuloksissa.

7.2.1 Lattahavainnot

Seuraavassa taulukossa on esitetty vaakalatan pituudenmäärittämisessä ilmenneet poikkeamat. Havainnot tehtiin kaikilla kannoilla mittakaavan määrittämisessä kannan puolivälissä ja myöhemmin mittausvaiheessa latan ollessa kohdetilassa. Pituushavainto on kahden latan päässä olevan reiän välinen pituus. Ohjelmasta etäisyydet saatiin laskemalla analyysiosassa etäisyyden määrittäminen pisteestä pisteeseen.

Kanta	Kannan puolivälissä [mm]	Kohdetilassa [mm]
1	+0,00	+0,251
2	-0,04	+0,311
3	+0,03	+0,291
4	-0,02	+0,211
5	+0,00	+0,201
6	-0,04	+0,231
$\bar{x} = -0,01$		0,249
$s = 0,03$		0,044

Taulukko 1. Poikkeamat vaakalatan pituudenmäärittämisessä.

Pituuden määrittäminen kannan puolivälissä on lähes virheetön verrattaessa kohdetilassa mitattuihin pituuksiin. Tämä osoittaa sen, että orientointivaiheessa määritet-

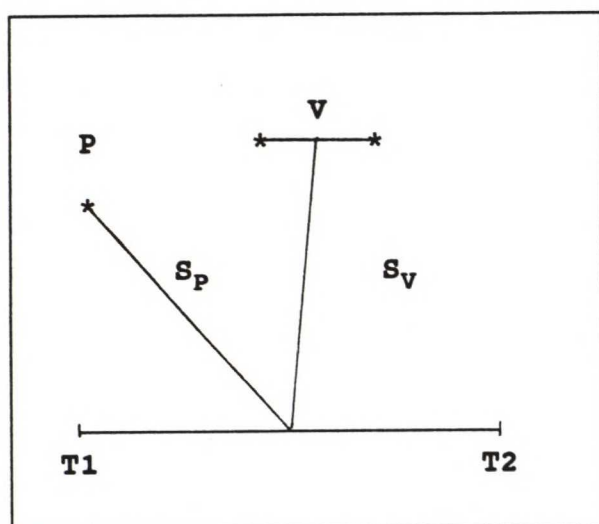
täessä mittakaavaa on mittatanko asetettava mittauskannalle teodoliittien puoleenväliin, jotta välttyään mittakaavavirheen siirtymiseltä koko mittaukseen. Yksi mahdollinen virhelähde näissä tuloksissa on analyysiosan etäisyyden laskenta. Mittakaavan määrittämisessä latan pituus lasketaan suoraan kulmahavainnoista, kun taas kohdetilassa latan kohdistusmerkit on mitattu kohdepisteinä ja pisteiden välinen etäisyys laskettu myöhemmin koordinaateista analyysiosassa. Vaikka virheet kohdetilassa mitatuissa arvoissakin jäävät alle 0,5 mm, on otettava huomioon, että pisimmilläänkin tangon etäisyys kannan puolivälistä oli 4 m ja latat oli aina sijoitettu hyvän geometrian alueelle.

Sillä muodostuuko virhe havainnoista vai analyysiosassa, joka käyttää laskentaan koordinaatteja, ei ole suurtakaan merkitystä. Tärkeää on, että virhettä näin meneteltäessä muodostuu. Juuri tulosten analysoitavuuden pitäisi olla tämän tyyppisten järjestelmien vahvuus. Yleensä ei tiettyjen pisteiden koordinaateista olla niinkään kiinnostuneita, vaan kappaleiden muodoista ja dimensioista.

Pystyasentoisen ns. xyH-latan vertauspituuksina käytettiin kolmen ylimmän mittamerkin etäisyyttä alimmasta merkistä. Pituudet olivat: 0,299606 m, 0,899687 m ja 1,199643 m. Lattahavainnot tarkasteltiin kantakohtaisesti sekä lattapituuskohtaisesti. Kantakohtaisessa tarkastelussa tutkittiin lattapituuden vaikutusta virheeseen. Lattapituuskohtaisen tarkastelun jälkeen tarkasteltiin latan etäisyyden sekä etäisyyden ja kannan pituuden välisen suhteen vaikutusta virheeseen. Latan etäisyys määriteltiin latan etäisyydeksi kannan puolivälistä ja vaakalatan ollessa kyseessä, latan keskikohdan etäisyydeksi kannan puolivälistä (kts. kuva 9).

Tarkasteltaessa havainnot kantakohtaisesti oli lattapituushavainnot jokaisella kannalla neljä kappaletta: pystylatan kolme pituutta ja vaakalatta. Kantakoh-

tainen tarkastelu näyttää lattapituuden vaikutuksen virheeseen, koska samalla kannalla mitattuihin pituuksiin tulee samanlaiset orientoinnista, painumisesta ja muista vastaavista aiheutuvat virheet. Pystylatan pituuksiin on lisäksi samanlainen geometrian vaikutus.



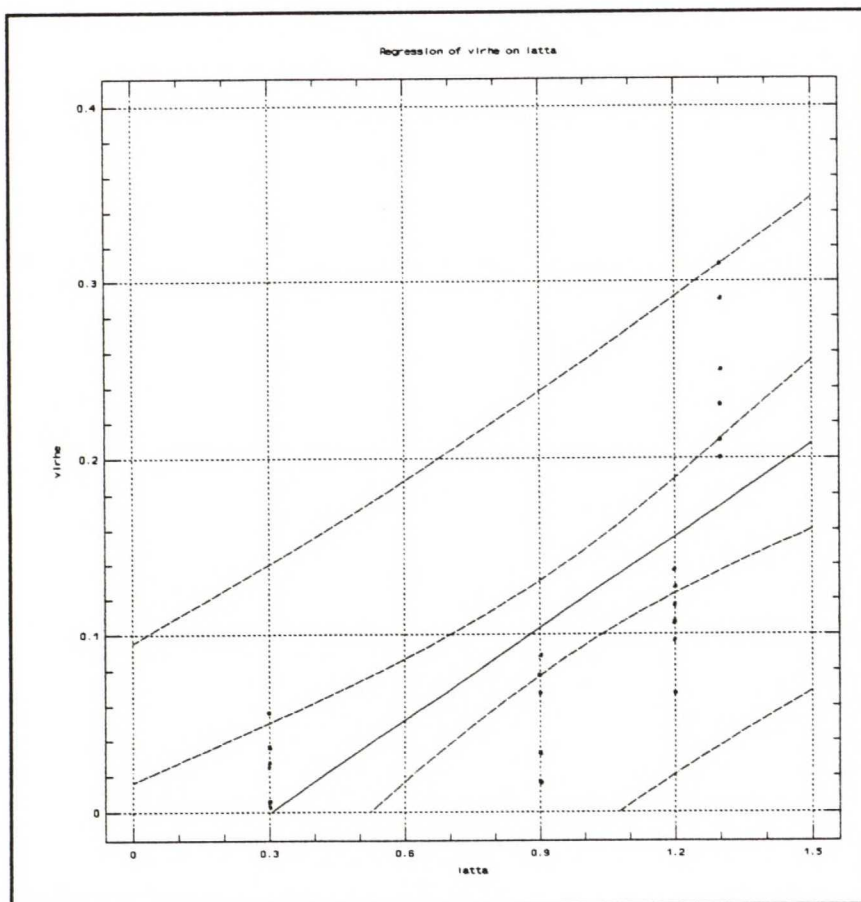
Kuva 9. Lattojen etäisyydet S_P ja S_V kannasta; V on vaakalatta, P on pystylatta sekä $T1$ ja $T2$ ovat teodo-liitit.

Virheitä tarkasteltiin analysoimalla kukin kanta erikseen ja lopuksi kaikki yhdessä. Kuhunkin aineistoon sovitettiin ensin lineaarinen regressiomalli, $Y = a + bX$ ja sitten eksponentiaalinen regressiomalli, $Y = e^{(a+bX)}$. Ohjelma sovittaa aineistoon mallin, jossa tutkitaan riippuvan muuttujan suhdetta riippumattomaan muuttujaan minimoimalla residuaalien neliösummia sovitettuun suoraan.

Sovitettaessa kantakohtaiseen lattapituus/virhe-aineistoon sekä lineaarinen että eksponentiaalinen regressiomalli huomataan korrelaatiota löytyvän. Tarkasteltaessa kaikkia kantoja yhdessä saadaan enemmän havaintoja ja sitä kautta mallien antamista tuloksista luotettavammaksi kuin mitä saadaan tarkasteltaessa ainoastaan yhdeltä kannalta tehtyjä neljää havaintoa. Kuvissa 10 a

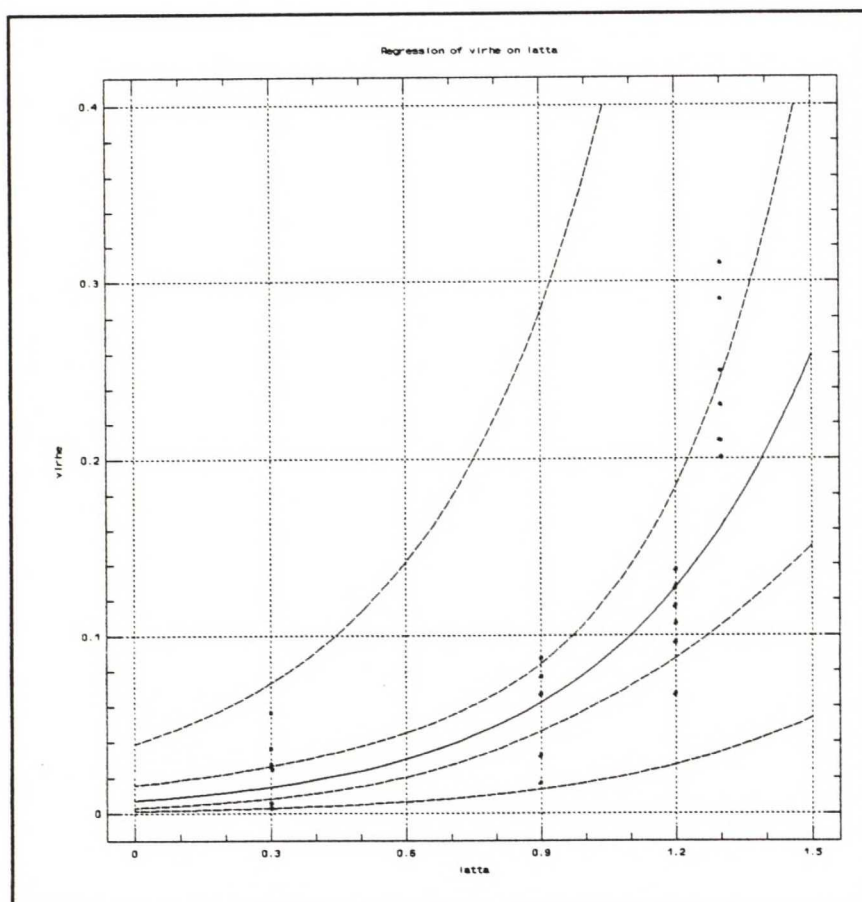
ja b on esitetty sekä lineaarisen että eksponentiaalisen regressioanalyysin kuvaajat kun havaintoaineistona on kaikki lattapituudet kaikilta kannoilta, riippumattomana parametrina latan pituus ja riippuvana parametrina pituuden määrittelyn virhe.

Selitysaste on tilastollisesti merkittävä molemmissa malleissa sekä merkitsevyystaso (Prob.Level) hyvin lähellä nollaa (riski 5 %). Ratkaisevaksi tekijäksi muodostuu varianssianalyysistä saatava painoysikön keskivirheen arvo tasoituksen jälkeen, joka eksponentiaalisessa mallissa on 0,719 mm ja lineaarisessa mallissa 0,063 mm. Ero on yli kymmenkertainen. Määritettävä pituus vaikuttaa siis lineaarisesti virheen kasvuun.



Kuva 10. a) Havaintoaineistoon sovitettu lineaarinen regressiomalli. Vaaka-akselilla on lattapituus [m] ja pystyakselilla pituuden määrittelyn virhe [mm].

Lineaarisessa regressioanalyysissä saadaan suoraan kulmakertoimen (Slope) arvosta virheen ppm-arvo jakamalla se 1000:lla. Varianssin analyysissä korrelaatiokerroimen neliö (R-squared), eli selitysprosentti, ilmoittaa kuinka moni prosenttisesti riippuvan parametrin vaihtelu selittyy riippumattomalla parametrilla. Tässä tapauksessa, kuinka virheen vaihtelu riippuu pituudesta. Estimaatin keskivirhe (Std. Error of Est.) on painoyksikön keskivirhe tasoituksen jälkeen eli sama kuin yhden mittauksen keskivirhe. Regressioanalyysit ja niistä piirretyt kuvat on kokonaisuudessaan esitetty liitteessä 1. Kuvissa suoraa lähinnä olevat katkoviihalla esitetyt käyrät ovat 95 %:n varmuusvälit ja uuloimmat käyrät ovat 95 %:n ennustekäyrät. Ennustekäyrät kuvaavat väliä, johon uudet havainnot annetulla todennäköisyydellä sijoittuisivat.



Kuva 10. b) Havaintoaineistoon sovitettu eksponentiaalinen regressiomalli. Vaaka-akselilla on lattapituus [m] ja pystyakselilla pituuden määrityksen virhe [mm].

Ekspotentiaalisen tarkastelun tekee hieman epäluotettavaksi se, että neljäs havainto on eri latasta, jonka sijainti ja asento oli eri. Sijainnit olivat erilaiset, mutta pääsääntöisesti samanlaisen geometrian alueella, mutta latan asento on saattanut vaikuttaa tuloksiin. Ero voi myös johtua yksinkertaisesti lattojen erilaisista kohdistusmerkeistä.

Seuraavaksi lattahavaintoja tarkasteltiin lattakohtaisesti vertaamalla latan etäisyyden vaikutusta virheeseen. Mallien selittävyysaste on merkittävä, mutta ne ovat toisistaan täysin poikkeavat, mikä tekee johtopäätösten teon vaikeaksi. Etäisyyksien pitäisi olla suurempia ennenkuin sillä voisi laskea olevan merkitystä.

Samoin suhteen etäisyys/kanta vaikutus virheeseen ei tule ilmi näillä etäisyyksillä. Mittausgeometrian kulmaisten sääntöjen mukaan kohteen tulisi sijaita kannan kolmanneksen etäisyydellä, jolloin tässä käytetty suhde olisi 0,333. Kojesalin muodon takia kannat jäivät lyhyiksi ja suhde näissä mittauksissa oli lähes koko ajan suurempi kuin 1.

Regressiosuoran kulmakerroin eli mittakaavavirhe kertoo mittauksen epätarkkuuden ja painoyksikön keskivirhetasoituksen jälkeen epävarmuuden. Testimittauksista saatu mittakaavavirhe on $174,0 \pm 33,2$ ppm merkitsevyystasolla 0,00003. Epävarmuudeksi saatiin 0,063 mm.

7.2.2 Kohdepistehavainnot

Kohdepisteille ei tunnettu mitään referenssiarvoja, pisteiden sijainnit oli satunnaisesti valittu salista kattavan aineiston saamiseksi. Tarkastelun kohteena näin ollen olivatkin vain eri kannoilta mitatut samojen pisteiden koordinaatit. Seuraavalla sivulla on taulukossa 3 esitetty pisteiden keskivirheet. Havaintojen lukumäärällä tarkoitetaan kuinka monelta kannalta piste

on mitattu, eli todellisuudessa teodoliittihavainnot
on kaksi kertaa enemmän.

Piste	Hav. lkm.	s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]	s_p [mm]
1	4	0,460/-	0,243/-	0,090/-	0,528/-
2	4	0,402/-	0,170/-	0,112/-	0,451/-
3	4	0,266/-	0,154/-	0,153/-	0,343/-
4	3	0,064/-	0,055/-	0,115/-	0,143/-
5	3	0,356/-	0,061/-	0,199/-	0,412/-
6	4	0,116/0,25	0,124/0,17	0,083/0,05	0,189/0,306
7	4	0,119/0,25	0,056/0,18	0,047/0,04	0,139/0,310
8	4	0,164/0,25	0,039/0,18	0,052/0,04	0,176/0,310
9	4	0,105/0,25	0,143/0,18	0,062/0,03	0,188/0,310
10	3	0,042/0,13	0,076/0,13	0,069/0,03	0,111/0,186
11	5	0,066/0,05	0,085/0,07	0,042/0,03	0,116/0,091
12	3	0,055/0,05	0,031/0,07	0,038/0,02	0,073/0,088
13	5	0,023/0,05	0,144/0,04	0,086/0,02	0,169/0,067
14	5	0,035/0,05	0,054/0,05	0,112/0,02	0,130/0,073
15	5	0,040/0,05	0,067/0,04	0,074/0,03	0,108/0,071
16	5	0,053/0,05	0,036/0,07	0,033/0,02	0,072/0,088
17	6	0,040/0,04	0,058/0,07	0,032/0,02	0,077/0,083
18	5	0,026/0,03	0,043/0,07	0,033/0,02	0,060/0,079
19	5	0,043/0,03	0,079/0,07	0,048/0,02	0,102/0,079
20	5	0,029/0,03	0,089/0,07	0,047/0,03	0,105/0,082
21	5	0,019/0,02	0,046/0,04	0,019/0,02	0,054/0,049
22	5	0,007/0,02	0,058/0,05	0,015/0,01	0,060/0,055
23	5	0,008/0,02	0,032/0,04	0,018/0,03	0,038/0,054
24	4	0,142/-	0,112/-	0,084/-	0,199/-
25	4	0,297/-	0,213/-	0,051/-	0,369/-
26	4	0,278/-	0,162/-	0,100/-	0,337/-
27	2	0,021/0,05	0,064/0,10	0,035/0,03	0,076/0,116
28	3	0,167/0,09	0,134/0,12	0,127/0,02	0,249/0,151
29	3	0,058/0,09	0,051/0,11	0,124/0,03	0,146/0,145
30	3	0,120/0,09	0,053/0,11	0,155/0,04	0,203/0,148
31	3	0,164/0,08	0,072/0,11	0,166/0,04	0,245/0,142
32	6	0,062/0,04	0,019/0,02	0,048/0,02	0,081/0,049
33	6	0,029/0,03	0,025/0,02	0,024/0,02	0,045/0,041
34	6	0,048/0,03	0,015/0,02	0,008/0,02	0,051/0,041
35	6	0,052/0,04	0,052/0,04	0,033/0,03	0,080/0,064
36	6	0,017/0,03	0,070/0,04	0,038/0,03	0,081/0,058

$\sqrt{\Sigma S^2 / N} : 0,161/0,105 \quad 0,099/0,095 \quad 0,086/0,029 \quad 0,207/0,144$

Taulukko 3. Kohdepisteiden keskivirheet: koordinaatti-
keskivirheet ja pistekeskivirheet.

Keskivirheet on laskettu erikseen kullekin koordinaatille (s_x , s_y , s_z) ja lopuksi ne on yhdistetty pistekeskivirheeksi (s_p). Koordinaattien keskivirheitä on ilmoitettu kahdet, missä kauttaviivan jälkeen olevat ovat ManCAT- ohjelman antamat keskivirheet. Kullekin keskivirheelle on alimmalla rivillä ilmoitettu neliökeskivirhe. Pistekeskivirheiden neliökeskivirhe ilmoittaa koko mittauksen keskivirheen, epävarmuuden.

Keskivirheet vaihtelevat huomattavasti, toisilla pisteillä keskivirhe saattaa olla kymmenkertainen toiseen pisteeseen verrattuna. Pääsääntöisesti pisteet, joiden keskivirhe on suuri, sijaitsevat sellaisessa kohdassa salia, että ne ovat kuuluneet huonon geometrian alueeseen lähes jokaiselta kannalta mitattaessa. Tällaisten havaintojen tarkastelusta pois jättäminen ei kuitenkaan ollut mahdollista, koska niitä oli niin paljon, että se olisi huomattavasti vähentänyt havaintoaineistoa. Lisäksi mikään yksittäinen havainto ei ratkaisevasti poikennut muista, vaan hajonta toisilla pisteillä oli suurempaa.

Järjestelmän epävarmuudeksi koordinaattierotarkastelussa saatiin 0,207 mm, jota voidaan verrata lattapituustarkastelussa saatuun epävarmuuslukuun 0,045 mm ($= 0,063 \text{ mm}/\sqrt{2}$).

8 JÄRJESTELMIEN KALIBROINTI

Geodeettisiin erikoismittauksiin tarkoitettujen ns. EPLA-järjestelmien tarkkuutta voidaan arvioida vastaavan kaltaisella havainto- ja laskentamenettelyllä kuin mitä edellä on esitetty. Ensimmäinen ja tärkein asia selvittää järjestelmästä on sen laskentaratkaisu. Se, ratkaiseeko ohjelma koordinaatit avaruussuorien leikkauksena vai erikseen vaaka- ja pystykulmahavainnoista tulee ilmi tarkasteltaessa usealta kannalta toistettuja havaintoja samoihin pisteisiin, mittausgeometrian huo-

nontuessa erot kasvavat. Näistä havainnoista johdetaan järjestelmän epävarmuus, hajonnan mitta, satunnaisvirheiden osuus. Kalibroitujen lattojen pituuksien määrittäminen havainnoista antaa tietoa systeemin epätarkkuudesta, eli järjestelmän systemaattisten ja satunnaisten virheiden suuruuden. Järjestelmäkalibroinnin ohella on teodoliitit ja mittakaavalatat lisäksi kalibroitava perinteisestikin.

Tarkoituksena ei ole luoda kalibrointia varten stabiilia, tarkasti tunnettua referenssipisteistöä, vaan havaintomenettely, jolla järjestelmän epävarmuus ja epätarkkuus voidaan määrittää. Käytettävien kohdepisteiden ei tarvitse olla tunnettuja eikä pisteistön tarvitse olla tiukasti stabiili kuin juuri mittauksen ajan. Käytetyt tarratähykset täyttävät stabiiliusvaatimuksen riittävän hyvin. Tarran liiman ikää ei tiedetä, mutta kun heikkenemistä ilmenee, riittää kun tähykset vaihdetaan uusiin suurin piirtein samoille sijoille. Mahdollinen pieni liikkuminen eri järjestelmien mittausten välillä ei ole merkittävää, koska tarkastelun alla on vain kunkin järjestelmän omat havainnot.

Kalibrointikehys muodostuu kohdepistehavaintojen tarkastelusta. Kohdepisteitä ovat tähykset seinissä ja katossa sekä lattojen tähysmerkit. Jos lattoja on käytössä useita ja niiden liikkumattomuus kantojen vaihdon aikana voidaan varmistaa, on mahdollista suorittaa kalibrointimittaus pelkillä lattoihin tehdyillä havainnoilla. Näin lattojen tähysmerkkeihin tehtyjä havaintoja voitaisiin käyttää kahteen kertaan, pituuden määrittäyksessä ja pisteiden koordinaattierojen määrittäyksessä. Teknillisen korkeakoulun Geodesian laboratorion kokesaliin kalibrointi järjestetään käyttämällä hyväksi sekä seiniin kiinnitettyjä tähyksiä että lattoja.

Koska koko mittauksen koordinaatisto määritetään ensimmäisen kannan suhteen, on orientointi syytä tehdä huolellisesti eliminoimalla havaintomenettelyllä kaikki

mahdolliset virheet. Suhteellinen orientointi suoritetaan autokollimaatioperiaatteella ja mittakaavalatta mitataan mittauskannalla teodoliittien puolella välissä. Myöhemmissä orientoinneissa voidaan testata mittakaavan määrittystä asettamalla latta kohdetilaan. Manuaali ei varoita tarkkuuden heikentymisestä mittakaavaa määritettäessä muualla kuin teodoliittien puolella välissä, mutta pyrittäessä tarkkaan tulokseen on todistettu, että latta tulee mitata kannan puolivälissä (BILL et al., 1985). Testitapauksessakin pituudenmäärittäykseen syntyi eroa riippuen latan sijainnista.

Testimittauksissa kantoja oli kuusi ja kohdepisteitä 42 kpl, joista 6 oli lattahavaintoja. Näin laajoina mittauksia ei kuitenkaan ole järkevää ottaa kalibrointiin. Kalibrointimittaukset on pystyttävä tekemään yhden päivän aikana, etteivät ympäristön muutokset vaikuta tuloksiin. Kalibrointiin valitaan neljä (4) kantaa, neljä siksi että saadaan havaintoaineistosta luotettava, mutta ei kuitenkaan liian raskas yhtenä päivänä mitattavaksi. Valitut kannat ovat salin suuntaan katsoen pitkittäinen, poikittainen ja lävistäjäkannat eli testimittauksen kannat 1, 2, 3 ja 5.

Lattoja pitäisi olla vaaka- ja pystyasentoisia sekä eri pituisia, mahdollisimman pitkiäkin. Käytännössä voidaan käyttää kahta erisuuntaiseksi asetettua lattaa, jotka mitataan kaikilla kannoilla kahdessa eri sijainnissa. Latat tulee pystyttää niin, että niistä lasketut tulokset ovat vertailukelpoisia toisiinsa nähden kaikilla kannoilla. Pääsääntöisesti ne on mitattava ideaalisessa mittausgeometriassa, jotta varmistetaan pituuden määrittäksen varmuus yleensä. Lisäksi yhdet havainnot otetaan huonossa mittausgeometriassa, jolloin voidaan testata järjestelmän laskentamenetelmää. Jos pisteen koordinaatit ratkaistaan 2D+1D-mallilla, huononevat tulokset merkittävästi mittausgeometrian myötä. Lisäksi nähdään järjestelmän toimiminen ääritapauksessa, eli kuinka "huonoja" tuloksia se antaa ennenkuin kieltäytyy mit-

taamasta. Lattapituuksia saadaan täten vähintään neljä joka kannalta riippuen siitä kuinka moneen kohdistusmerkkiin latoissa havaitaan. Lattapisteitä ei voida tässä ottaa mukaan kohdepistetarkasteluun, koska ne on siirrettävä jokaisella kannalla ideaalisijantiin.

Kohdepisteiden valinnassa käytetään kriteereinä sitä, että piste voidaan mitata vähintään kolmelta kannalta. Pisteiden sijoittelu tulisi myös olla mahdollisimman kattava. Kohdepisteitä ja varsinkin orientoinnissa käytettäviä kontrollipisteitä tulee voida mitata kaikkien kantojen molemmilta puolilta. Lukumääräisesti pisteitä valitaan niin monta kuin yhden päivän aikana neljältä kannalta voidaan mitata. Joukossa pitäisi olla pisteitä, jotka ovat hyvässä mittausgeometriassa kaikilla käytetyillä kannoilla sekä pisteitä, jotka ovat joillakin kannoilla huonossa geometriassa.

Pisteiden valinnassa käytettiin testimittauksia, laske-malla ManCAT-ohjelmalla pistekeskihajonnat uudelleen käyttämällä vain kalibrointimittauksiin valittuja neljää kantaa. Neljää kantaa käyttäen lasketut pistekeskihajonnat on esitetty taulukossa 4 ja valitut pisteet on tummennettu. Testimittauksissa päätyseiniin liimatuista tähyksistä (numerot 4-6, 24-26 ja 28-30) vain nro 6 on mitattu kolmelta kannalta ja on näin ollen ainoa päätyseinältä kalibrointimittauksiin valittu piste. Pisteiden kattavan sijoittelun kannalta kuitenkin on tärkeää, että myös päädyissä on mitattavia pisteitä, joten näihin seiniin on asetettava uusia tähyksiä, jotka näkyvät kannalle 3 ja kahdelle muulle kannalle.

Kohdepisteiden koordinaattierojen laskennassa saadaan selville pistekeskihajonnat, joka kertoo järjestelmän sisäisen tarkkuuden. Lattapituuksien määrittämisessä tulee ilmi korreloivatko virheet, esimerkiksi pituuteen tai etäisyyteen, eli sisältyykö niihin systemaattisia virheitä vai onko kyse pelkästä hajonnasta. Näistä kahden tyyppisistä virheistä voidaan johtaa järjestel-

män epävarmuus, hajonta, joka voidaan ilmoittaa keskihajonnalla tai varmuusvälillä, tai jos systemaattisia virheitä todetaan, mutta niitä ei voida eliminoida, ilmoitetaan järjestelmän epätarkkuus.

Piste	Hav.lkm	s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]
1	2	0,14	0,09	0,04
2	2	0,15	0,09	0,04
3	2	0,14	0,09	0,04
4	2	0,18	0,06	0,05
5	2	0,14	0,04	0,04
6	3	0,25	0,17	0,05
7	3	0,25	0,18	0,04
8	3	0,25	0,18	0,04
9	3	0,25	0,18	0,03
10	3	0,13	0,13	0,03
11	3	0,03	0,04	0,02
12	3	0,05	0,07	0,02
13	3	0,03	0,03	0,02
14	3	0,03	0,03	0,01
15	3	0,03	0,03	0,02
16	3	0,02	0,04	0,02
17	4	0,02	0,03	0,02
18	4	0,02	0,03	0,02
19	4	0,02	0,04	0,02
20	4	0,02	0,04	0,02
21	4	0,02	0,04	0,02
22	4	0,03	0,04	0,03
23	4	0,02	0,04	0,03
24	2	0,22	0,08	0,03
25	2	0,24	0,10	0,03
26	2	0,23	0,09	0,05
27	2	0,04	0,05	0,02
28	2	0,06	0,06	0,02
29	2	0,06	0,06	0,02
30	2	0,06	0,05	0,02
31	2	0,05	0,05	0,03
32	4	0,02	0,01	0,01
33	4	0,02	0,01	0,01
34	4	0,02	0,01	0,01
35	4	0,02	0,02	0,02
36	4	0,02	0,02	0,02

Taulukko 4. Kohdepisteiden keskivirheet, havainnot neljältä kannalta, kalibrointiin valitut pisteet merkitty tummennetulla.

9 LOPPUSANAT

EPLA-järjestelmien kalibrointitarpeen lisääntyessä, pitäisi kalibrointia varten tehdä oma ohjelmansa, joka lukisi järjestelmän tulostedatata, vertaisi pituuksia nominaaliarvoihin ja laskisi keskivirheitä ja -hajontoja. Nyt, kun joudutaan syöttämään paljon numeroarvoja manuaalisesti, syntyy helposti näppäilyvirheitä, jotka saattavat sekoittaa koko tarkastelun. On myös huomiotava, että näin saadut epävarmuuden ja epätarkkuuden arvot liittyvät tähän tiettyyn kalibrointiympäristöön. Dimensioiden ja etäisyyksien kasvaessa tarkkuuden tunnusluvutkin muuttuvat.

Vaikka järjestelmän mittaustarkkuutta ja sitä kautta toimintaa voidaankin nyt arvioida, jää systeemissä edelleen mittaukset suorittava henkilöstö kalibroimatta. Mittaushenkilökunnalla tulisi olla tarpeeksi tietoa miten ja missä järjestelmällä voidaan mitata ja kuinka luotettavia tulokset ovat. Laitteiston tarkkuus ei aina olekaan sen näytössä näkyvien desimaalien suuruinen. Niin mittauksen tilaajan kuin suorittajankin tulisi olla tietoisia siitä, minkälainen tarkkuus on tarpeellinen ja mahdollinen.

10 LÄHDELUETTELO

Allan, A.L., 1988, *The Principles of Theodolite Intersection Systems*. Survey Review 29, 227, s.226-234.

Bill, R., Fohl, G., Quasnitza, H., Staiger, R., 1985, Fehlertheoretische Untersuchung des elektronischen Meß- und Berechnungssystems ECDS1 von KERN. Zeitschrift für Vermessungswesen 9, s.399-409.

Cooper, M.A.R., 1987, *Control Surveys in Civil Engineering*. London, Collins. 381 s.

Hradilek, L., 1984. *Three-dimensional terrestrial triangulation*. Stuttgart, Konrad Wittwer Verlag. 250 s.

Kaartinen, H., 1992, *Talonrakentamisen mittatarkkuus*. Espoo, TKK, Geodesian laboratorio, diplomityö.

Kärkäs, E., 1992, *Teodoliittihavaintojen laskennallinen käsittely 3D-koordinaatistossa*. Tampere, TTKK, Rakennustekniikan osasto, Geodesia ja fotogrammetria, lisen-siaattityö.

Lankinen, U., 1989, *Vapaan pisteverkon tasoituksesta ja analysoinnista*. Espoo, TKK, Geodesian laboratorio, diplomityö.

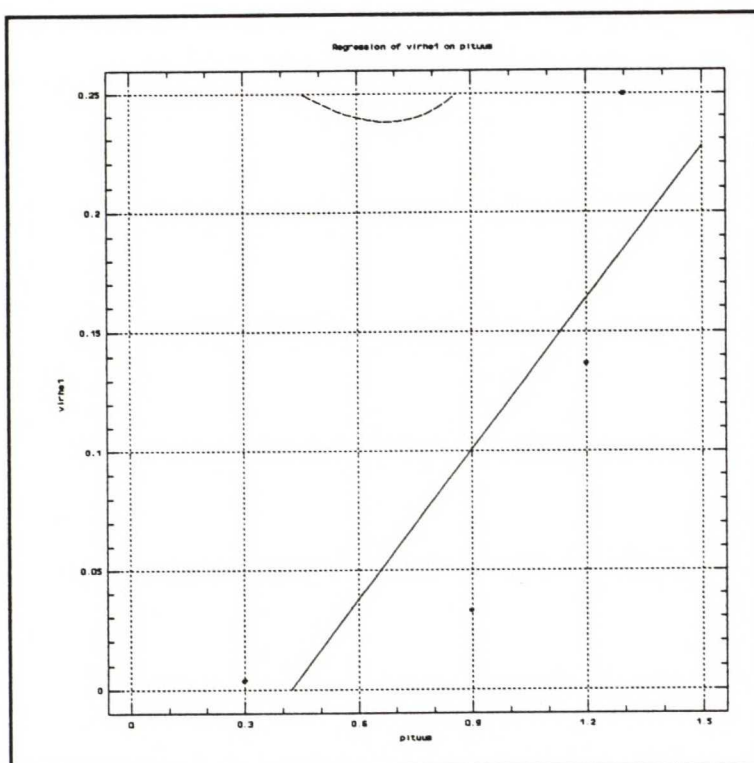
Martikainen, M., 1991, *Kolmiulotteinen teollisuusmittaus*. Nummela, Geoterra Oy. (Julkaisematon.)

Ollila, P., 1989, *Avaruuseteenpäinleikkauksen soveltamisesta teollisuusmittaukseen*. Espoo, TKK, Geodesian laboratorio, diplomityö.

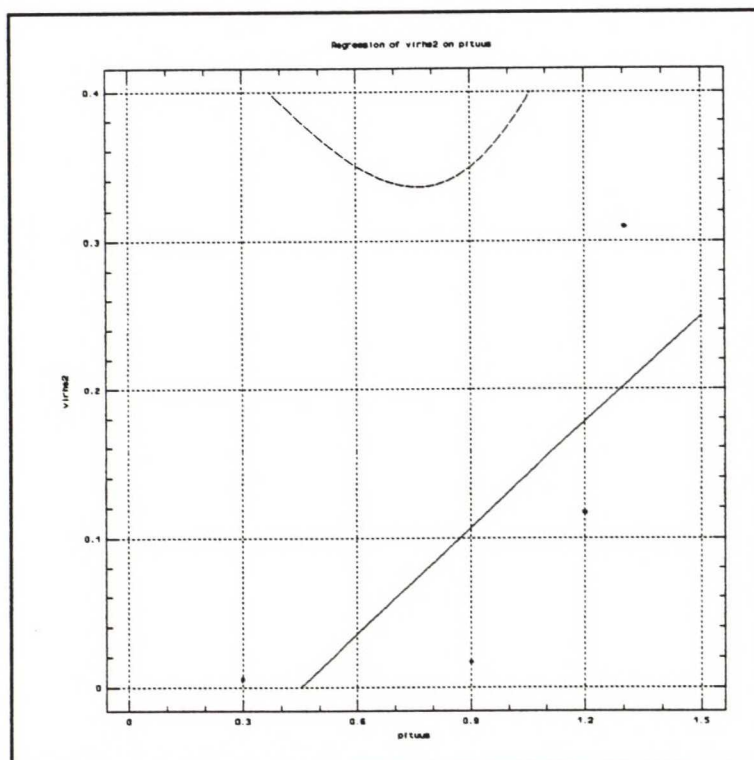
Santala, J. 1988. Mikä on EPLA ? Maanmittaus, 2, s.118-127.

TMS, Theodolite Measurement System (ManCAT) Manual,
Version 2.0 1990. Heerbrugg, Wild Leitz.

LIITE Lattahavaintojen regressioanalyysit.



Kanta 1, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.



Kanta 2, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhel

Independent variable: pituus

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-0.0889813	0.0928244	-0.958597	.43892
Slope	0.210835	0.0924887	2.27957	.15024

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0270277	1	.0270277	5.196456	.15024
Error	.0104023	2	.0052012		
Total (Corr.)	.0374300	3			

Correlation Coefficient = 0.849756
 Stnd. Error of Est. = 0.0721191

R-squared = 72.21 percent

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhe2

Independent variable: pituus

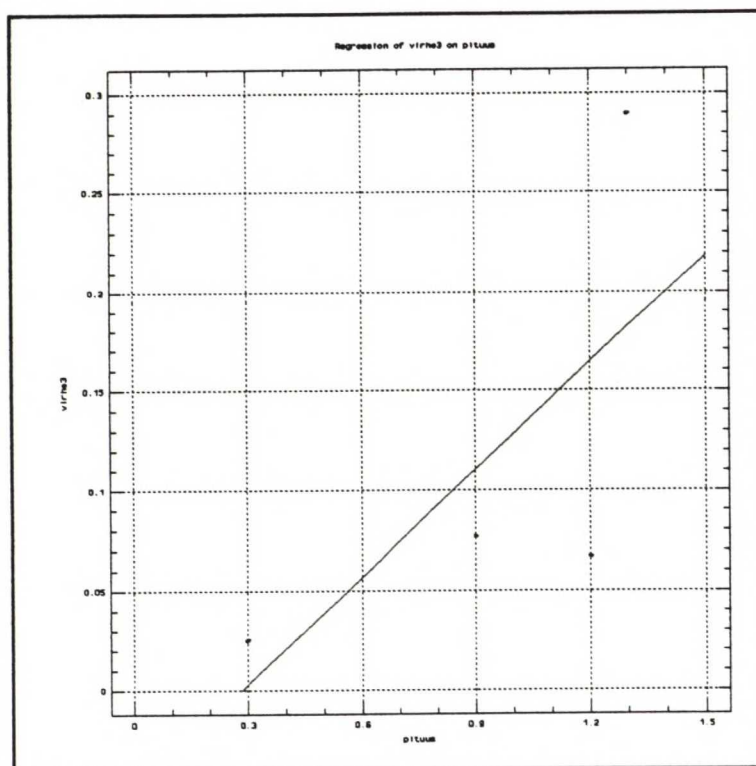
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-0.107097	0.144495	-0.74118	.53580
Slope	0.237451	0.143972	1.64929	.24087

Analysis of Variance

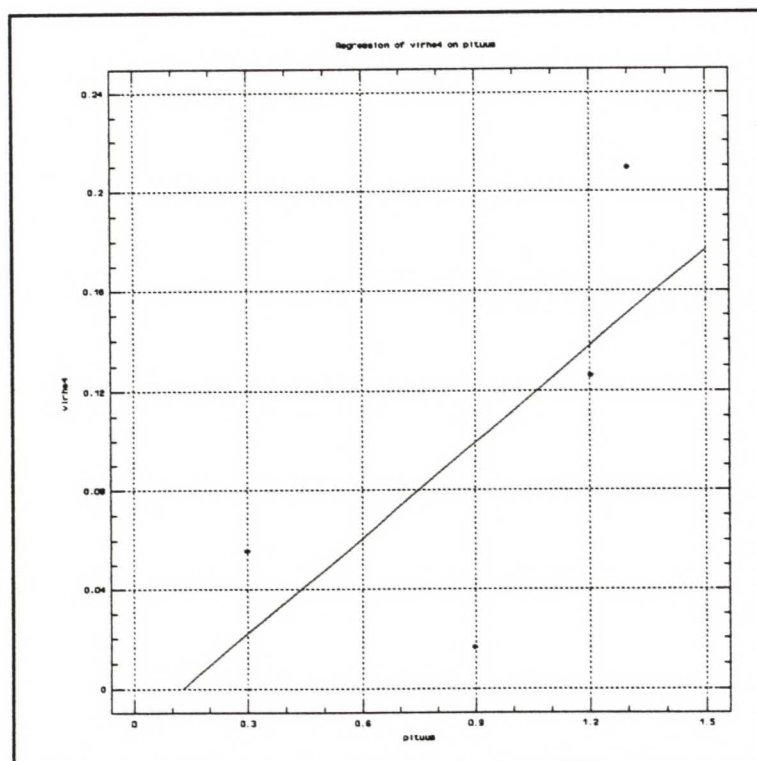
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0342826	1	.0342826	2.720151	.24087
Error	.0252064	2	.0126032		
Total (Corr.)	.0594890	3			

Correlation Coefficient = 0.759134
 Stnd. Error of Est. = 0.112264

R-squared = 57.63 percent



Kanta 3, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.



Kanta 4, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhe3

Independent variable: pituus

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-0.0509624	0.137161	-0.371552	.74590
Slope	0.179456	0.136665	1.31311	.31957

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0195813	1	.0195813	1.724264	.31957
Error	.0227127	2	.0113563		
Total (Corr.)	.0422940	3			

Correlation Coefficient = 0.680427
 Stnd. Error of Est. = 0.106566

R-squared = 46.30 percent

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhe4

Independent variable: pituus

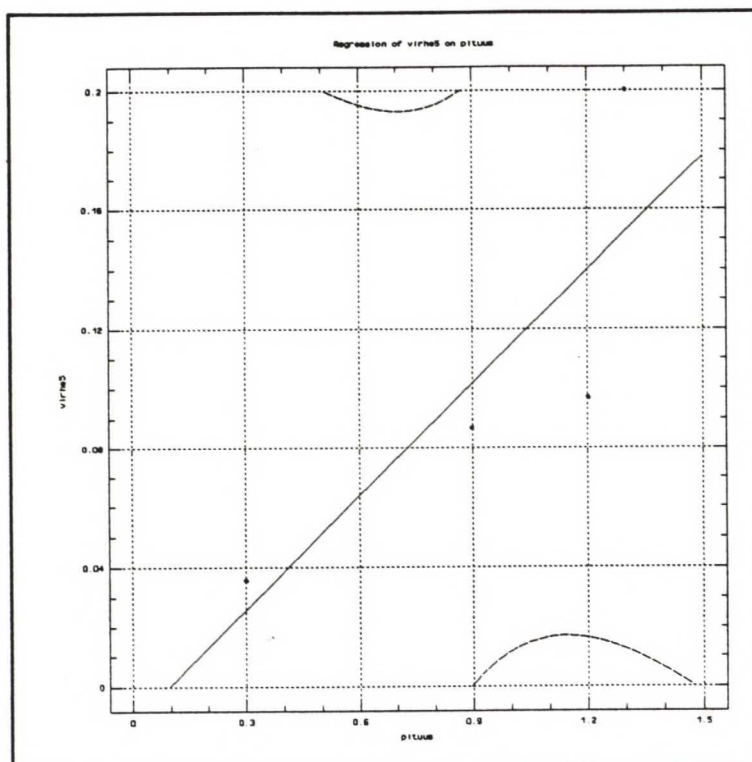
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-0.01662	0.0977741	-0.169984	.88066
Slope	0.128805	0.0974205	1.32216	.31707

Analysis of Variance

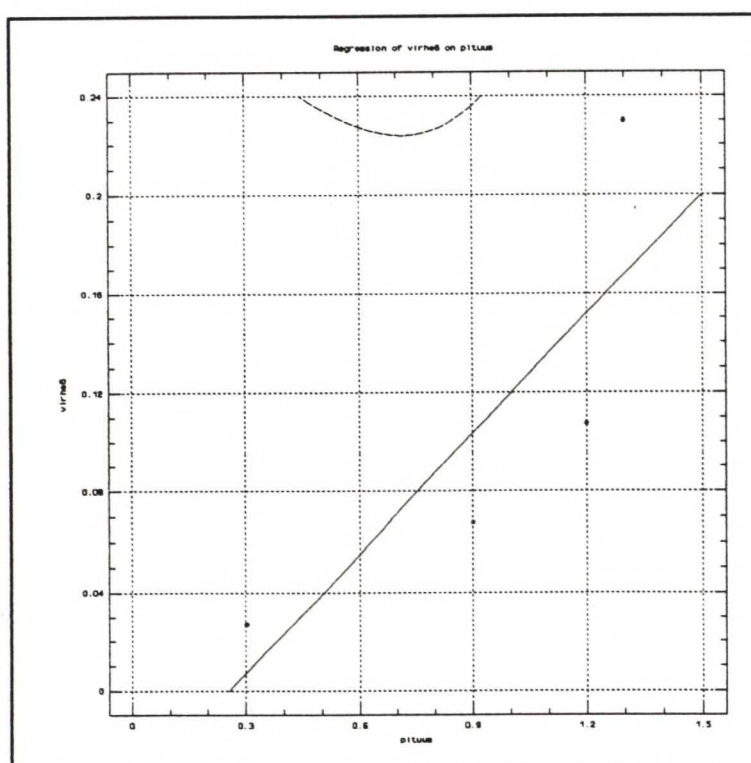
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0100877	1	.0100877	1.748106	.31707
Error	.0115413	2	.0057706		
Total (Corr.)	.0216290	3			

Correlation Coefficient = 0.682933
 Stnd. Error of Est. = 0.0759648

R-squared = 46.64 percent



Kanta 5, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.



Kanta 6, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhe5			Independent variable: pituus	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-0.0122123	0.060417	-0.202133	.85851
Slope	0.126743	0.0601985	2.10541	.16988

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0097672	1	.0097672	4.432754	.16988
Error	.0044068	2	.0022034		
Total (Corr.)	.0141740	3			

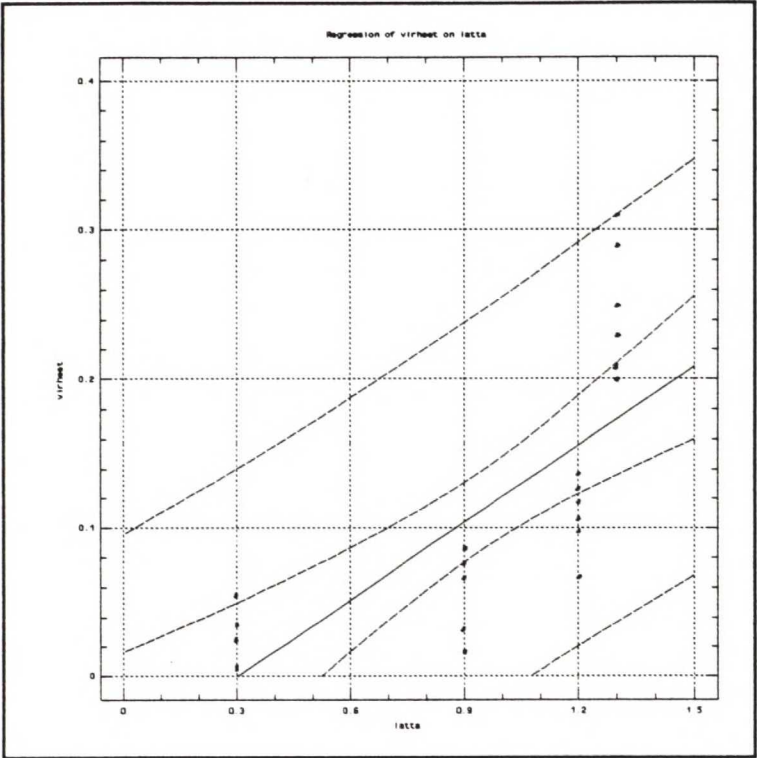
Correlation Coefficient = 0.830115 R-squared = 68.91 percent
Std. Error of Est. = 0.0469405

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhe6			Independent variable: pituus	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-0.0412991	0.0790719	-0.522298	.65355
Slope	0.160898	0.0787859	2.04221	.17788

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0157407	1	.0157407	4.170635	.17788
Error	.0075483	2	.0037742		
Total (Corr.)	.0232890	3			

Correlation Coefficient = 0.822122 R-squared = 67.59 percent
Std. Error of Est. = 0.0614342



Kaikki kannat, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virheet

Independent variable: latta

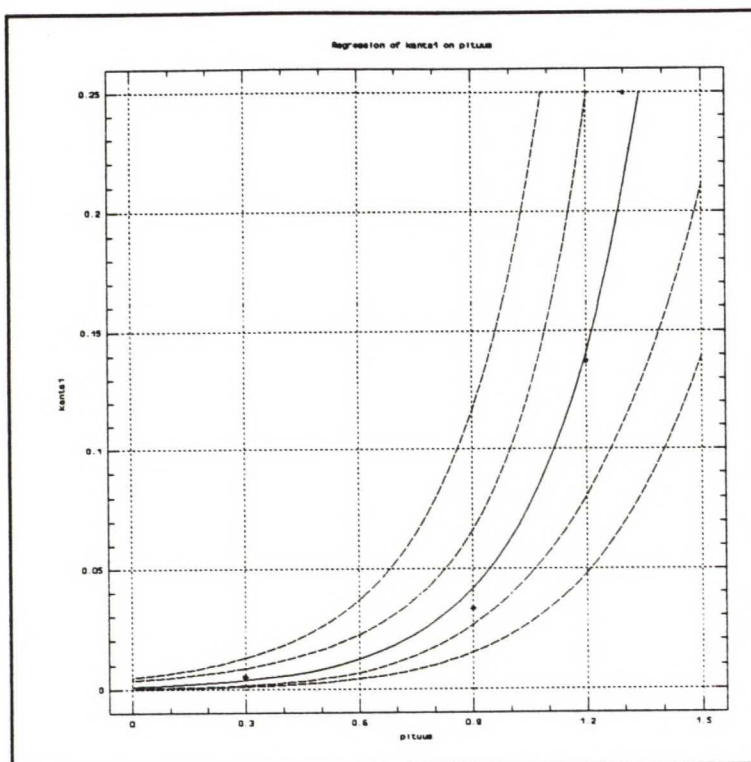
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-0.0528619	0.0332825	-1.58828	.12649
Slope	0.174031	0.0331621	5.24789	.00003

Analysis of Variance

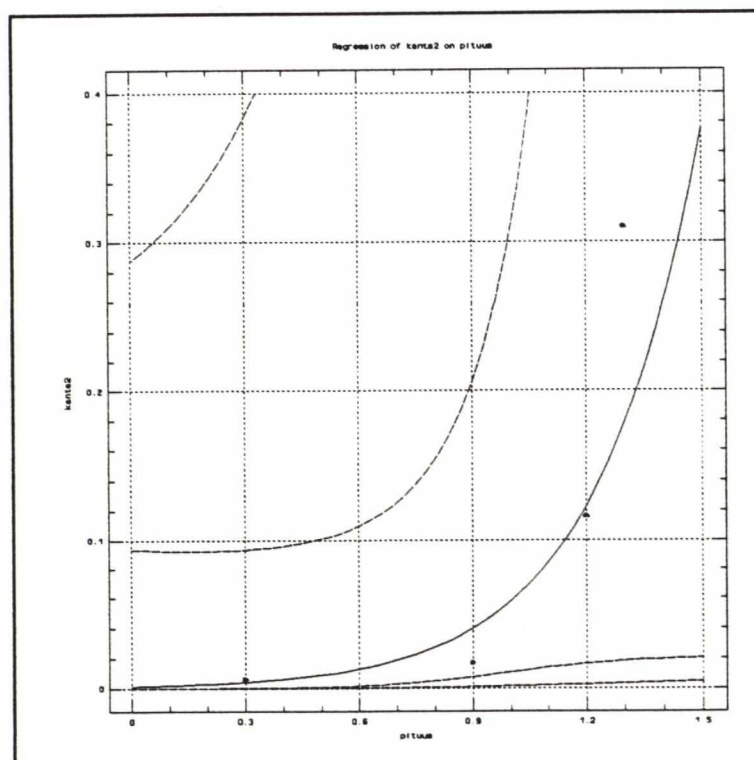
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.110492	1	.110492	27.54037	.00003
Error	.088264	22	.004012		
Total (Corr.)	.198756	23			

Correlation Coefficient = 0.745599
Std. Error of Est. = 0.0633403

R-squared = 55.59 percent



Kanta 1, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.



Kanta 2, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a+bX)$

Dependent variable: kantal			Independent variable: pituus	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-6.83483	0.274697	-24.8814	.00161
Slope	4.0637	0.273703	14.8471	.00451

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	10.04091	1	10.04091	220.4374	.00451
Error	.0910999	2	.0455499		
Total (Corr.)	10.132008	3			

Correlation Coefficient = 0.995494 R-squared = 99.10 percent
 Stnd. Error of Est. = 0.213424

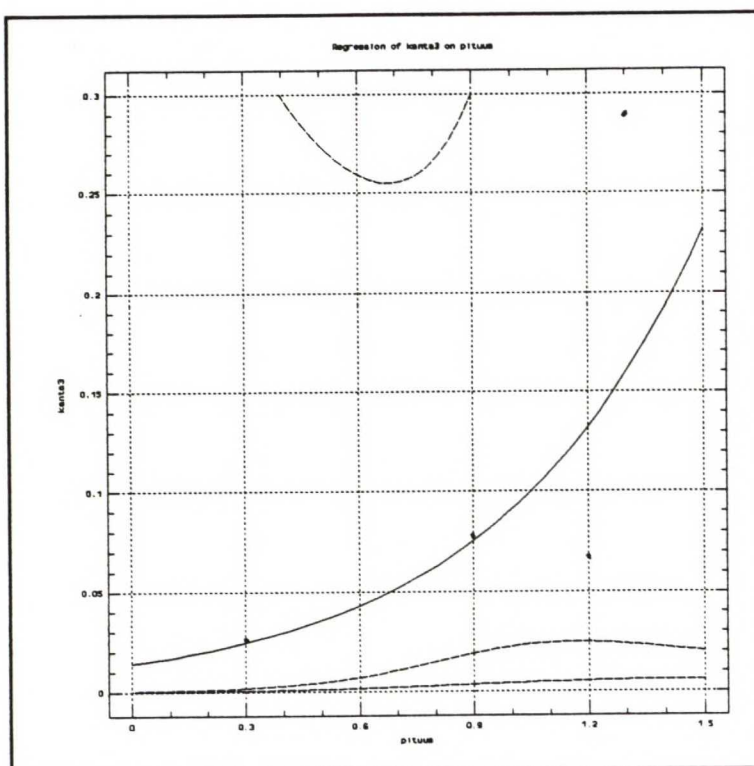
Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a+bX)$

Dependent variable: kanta2			Independent variable: pituus	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-6.58162	0.978928	-6.72329	.02141
Slope	3.7357	0.975388	3.82996	.06191

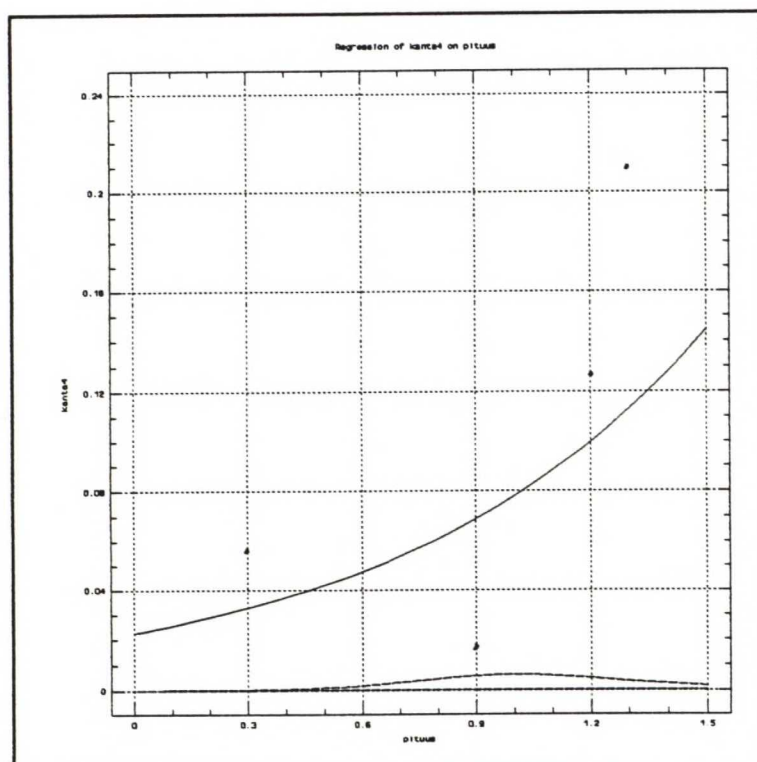
Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	8.485396	1	8.485396	14.66861	.06191
Error	1.1569466	2	.5784733		
Total (Corr.)	9.6423427	3			

Correlation Coefficient = 0.938091 R-squared = 88.00 percent
 Stnd. Error of Est. = 0.760574



Kanta 3, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.



Kanta 4, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a+bX)$

Dependent variable: kanta3

Independent variable: pituus

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-4.27023	0.825322	-5.17402	.03538
Slope	1.87239	0.822337	2.27691	.15052

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	2.1316763	1	2.1316763	5.184334	.15052
Error	.8223530	2	.4111765		
Total (Corr.)	2.9540293	3			

Correlation Coefficient = 0.84948
 Stnd. Error of Est. = 0.64123

R-squared = 72.16 percent

Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a+bX)$

Dependent variable: kanta4

Independent variable: pituus

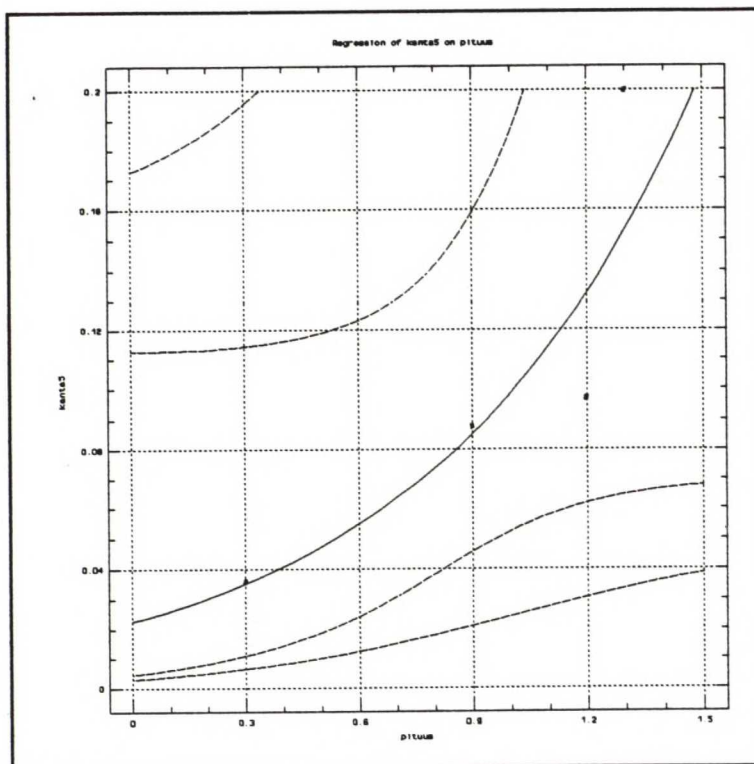
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-3.78797	1.49146	-2.53978	.12631
Slope	1.23559	1.48606	0.831454	.49318

Analysis of Variance

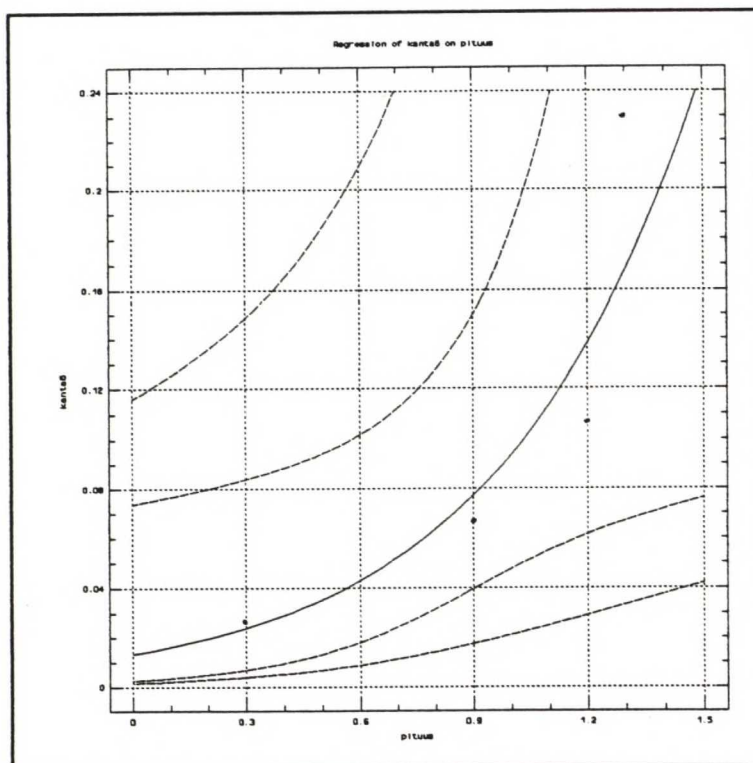
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.9282827	1	.9282827	.691317	.49318
Error	2.6855503	2	1.3427752		
Total (Corr.)	3.6138330	3			

Correlation Coefficient = 0.506823
 Stnd. Error of Est. = 1.15878

R-squared = 25.69 percent



Kanta 5, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.



Kanta 6, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a+bX)$

Dependent variable: kanta5

Independent variable: pituus

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-3.78709	0.372632	-10.1631	.00954
Slope	1.47053	0.371284	3.96066	.05823

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	1.314851	1	1.314851	15.68681	.05823
Error	.1676378	2	.0838189		
Total (Corr.)	1.4824888	3			

Correlation Coefficient = 0.941765
 Stnd. Error of Est. = 0.289515

R-squared = 88.69 percent

Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a+bX)$

Dependent variable: kanta6

Independent variable: pituus

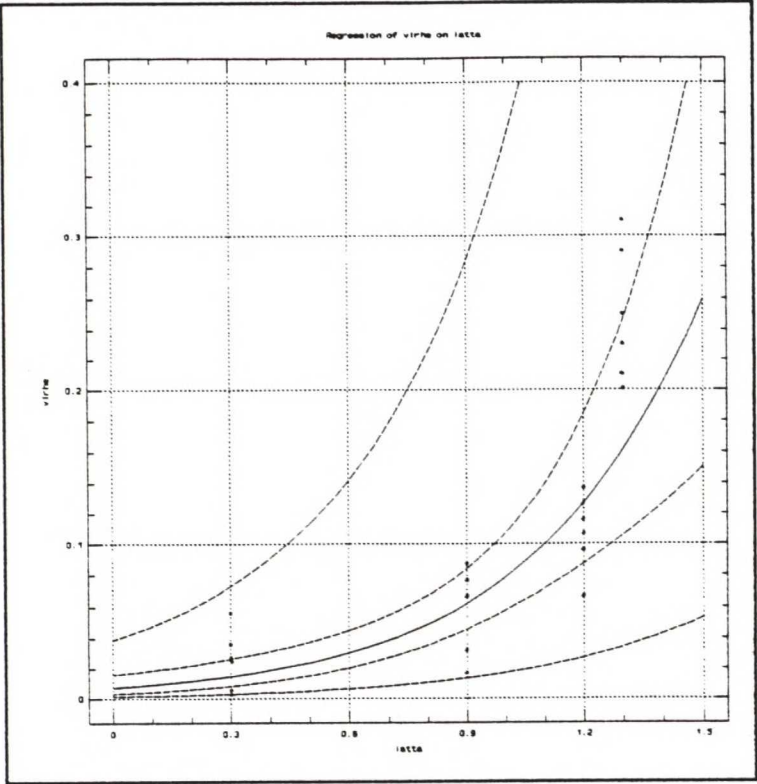
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-4.31455	0.396694	-10.8763	.00835
Slope	1.94659	0.395259	4.92484	.03884

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	2.303973	1	2.303973	24.25409	.03884
Error	.1899864	2	.0949932		
Total (Corr.)	2.4939598	3			

Correlation Coefficient = 0.961156
 Stnd. Error of Est. = 0.30821

R-squared = 92.38 percent



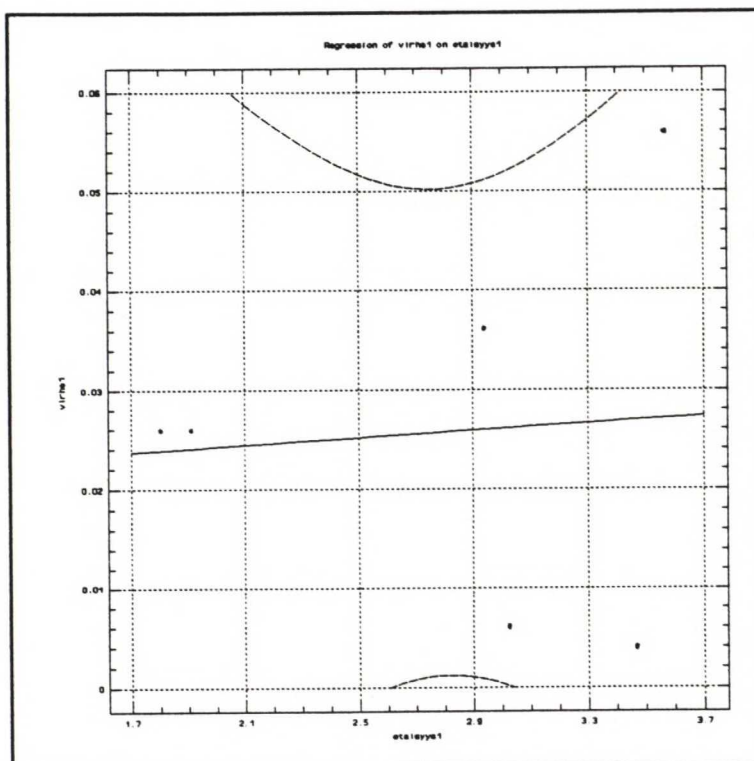
Kaikki kannat, vaaka-akselilla on lattapituus, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Exponential model: $Y = \exp(a+bX)$

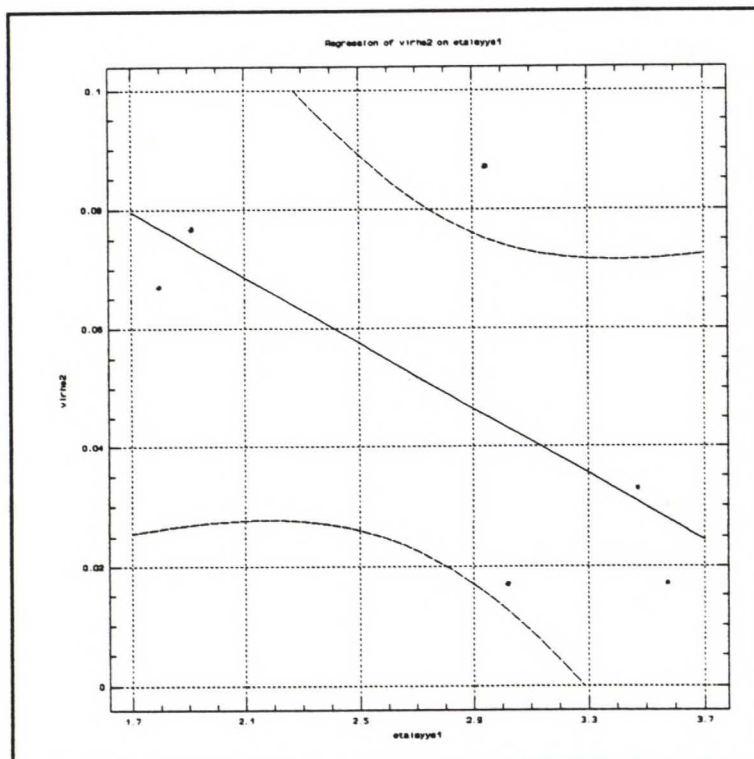
Dependent variable: kannat		Independent variable: latat		
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	-4.9294	0.377613	-13.0541	.00000
Slope	2.38743	0.376247	6.34538	.00000

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	20.793980	1	20.793980	40.26386	.00000
Error	11.361471	22	.516443		
Total (Corr.)	32.155721	23			

Correlation Coefficient = 0.804155 R-squared = 64.67 percent
Std. Error of Est. = 0.71864



Pystylatta, vaaka-akselilla on etäisyys, pystyakselilla on virhe 101-102.



Pystylatta, vaaka-akselilla on etäisyys, pystyakselilla on virhe 101-103.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhel			Independent variable: etaisyys1	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.0205377	0.0364829	0.562939	.60353
Slope	1.84127E-3	0.0127072	0.1449	.89180

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0000098	1	.0000098	.020996	.89180
Error	.0018735	4	.0004684		
Total (Corr.)	.0018833	5			

Correlation Coefficient = 0.0722605 R-squared = .52 percent
 Stnd. Error of Est. = 0.021642

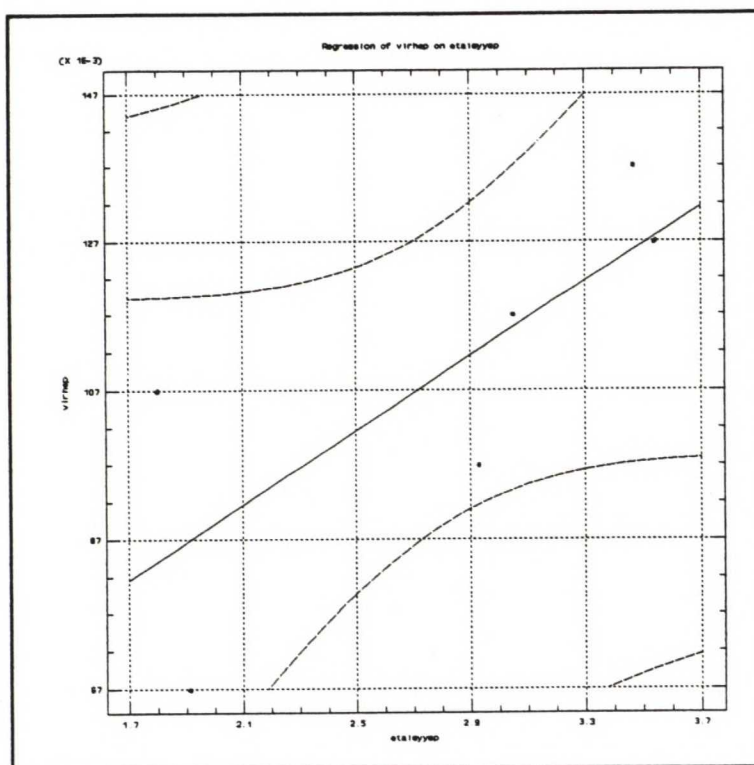
Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhe2			Independent variable: etaisyys1	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.126565	0.0433307	2.9209	.04320
Slope	-0.0276058	0.0150923	-1.82913	.14137

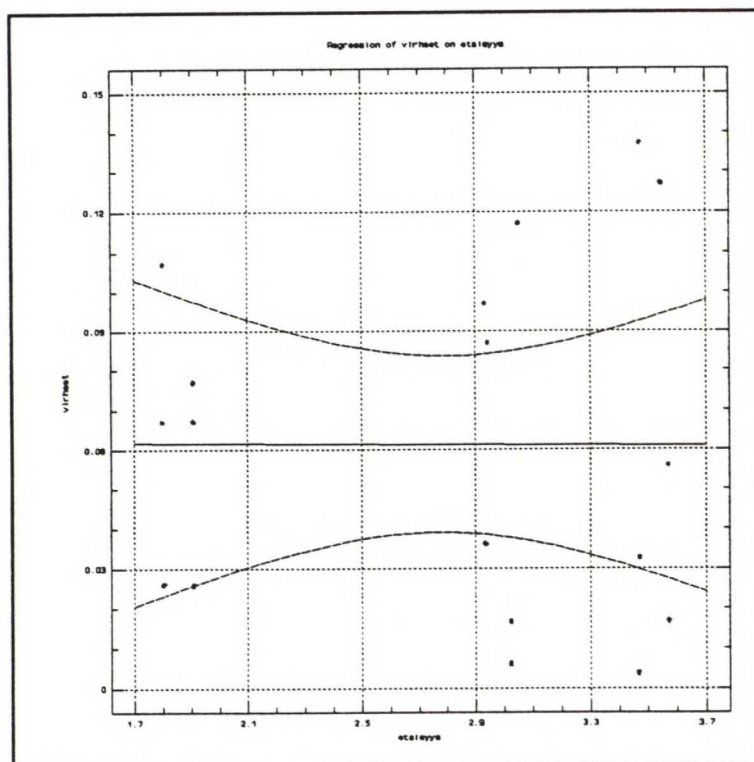
Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0022105	1	.0022105	3.345716	.14137
Error	.0026428	4	.0006607		
Total (Corr.)	.0048533	5			

Correlation Coefficient = -0.674881 R-squared = 45.55 percent
 Stnd. Error of Est. = 0.0257041



Pystylatta, vaaka-akselilla on etäisyys, pystyakselilla on virhe 101-104.



Pystylatta, vaaka-akselilla on etäisyys, pystyakselilla on kaikki virheet.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhep			Independent variable: etaisyys	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.038958	0.0303352	1.28425	.26839
Slope	0.0250424	0.0105762	2.3678	.07701

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0017995	1	.0017995	5.606479	.07701
Error	.0012839	4	.0003210		
Total (Corr.)	.0030833	5			

Correlation Coefficient = 0.763947
 Stnd. Error of Est. = 0.0179155

R-squared = 58.36 percent

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

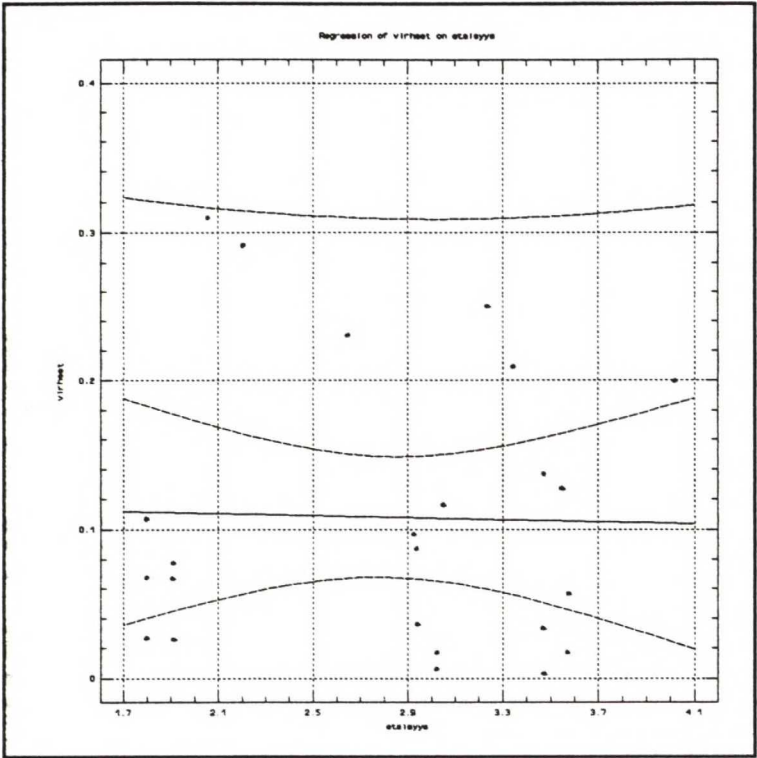
Dependent variable: virheet			Independent variable: etaisyys	
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.0624365	0.0433924	1.43888	.16946
Slope	-3.96132E-4	0.0151187	-0.0262014	.97942

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0000014	1	.0000014	.000687	.97942
Error	.031711	16	.001982		
Total (Corr.)	.031712	17			

Correlation Coefficient = -6.55022E-3
 Stnd. Error of Est. = 0.0445187

R-squared = .00 percent



Molemmat latat, vaaka-akselilla on etäisyys, pysty-akselilla on virheet.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

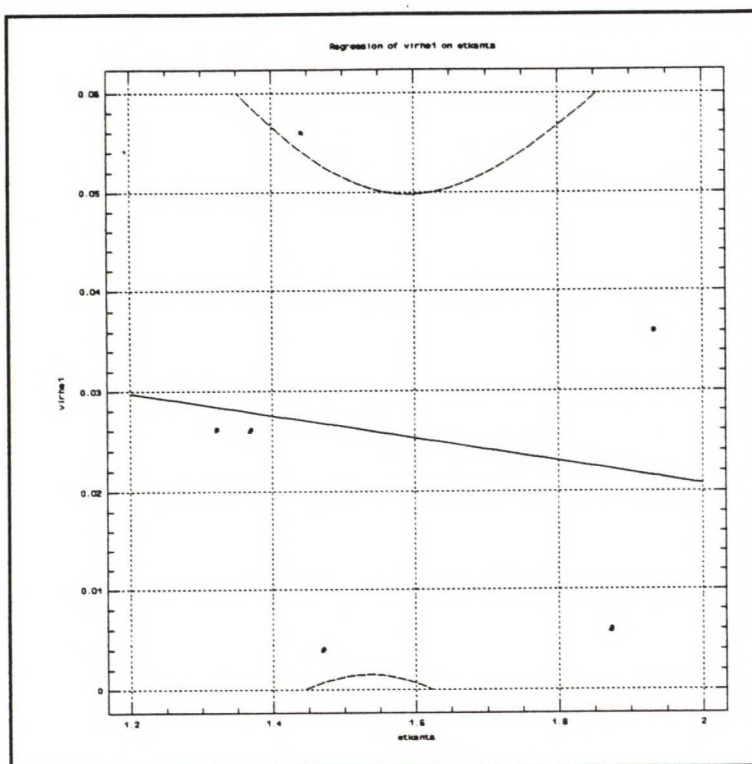
Dependent variable: virheet (+vaakal.) Independent variable: etäisyys

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.117701	0.0810739	1.45177	.16068
Slope	-3.413E-3	0.0279364	-0.12217	.90387

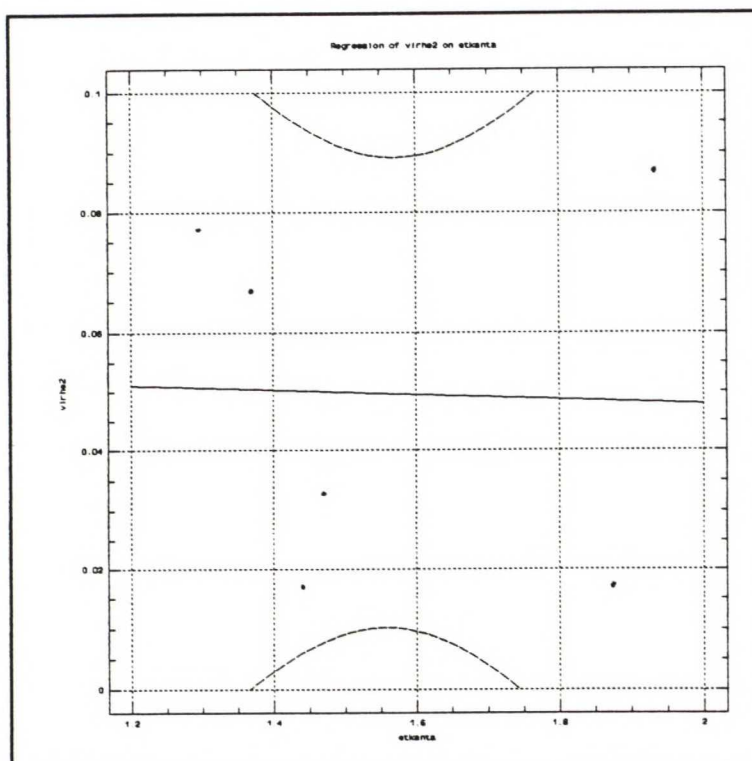
Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0001348	1	.0001348	.014926	.90387
Error	.198621	22	.009028		
Total (Corr.)	.198756	23			

Correlation Coefficient = -0.026038 R-squared = .07 percent
Std. Error of Est. = 0.095017



Pystylatta, vaaka-akselilla on etäisyyden suhde kantaan, pystyakselilla on virhe 101-102.



Pystylatta, vaaka-akselilla on etäisyyden suhde kantaan, pystyakselilla on virhe 101-103.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhel

Independent variable: etkanta

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.043226	0.056047	0.771244	.48359
Slope	-0.0112339	0.0354175	-0.317184	.76697

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0000462	1	.0000462	.100606	.76697
Error	.0018371	4	.0004593		
Total (Corr.)	.0018833	5			

Correlation Coefficient = -0.156634
 Stnd. Error of Est. = 0.0214309

R-squared = 2.45 percent

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhe2

Independent variable: etkanta

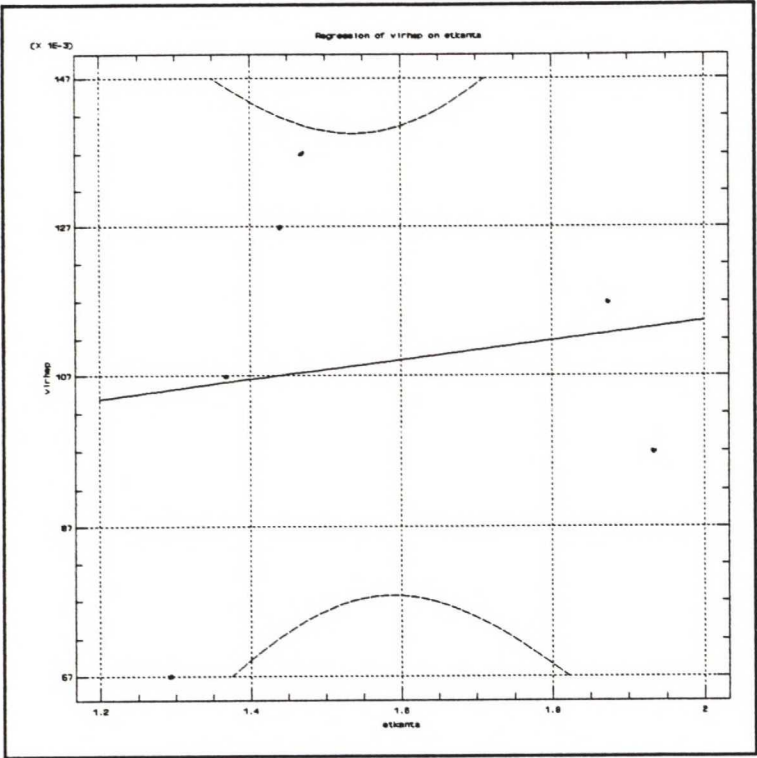
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.0559417	0.0910414	0.614465	.57214
Slope	-4.01459E-3	0.0575313	-0.0697809	.94772

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0000059	1	.0000059	.004869	.94772
Error	.0048474	4	.0012119		
Total (Corr.)	.0048533	5			

Correlation Coefficient = -0.0348692
 Stnd. Error of Est. = 0.0348118

R-squared = .12 percent



Pystylatta, vaaka-akselilla on etäisyyden suhde kantaan, pystyakselilla on virhe 101-104.

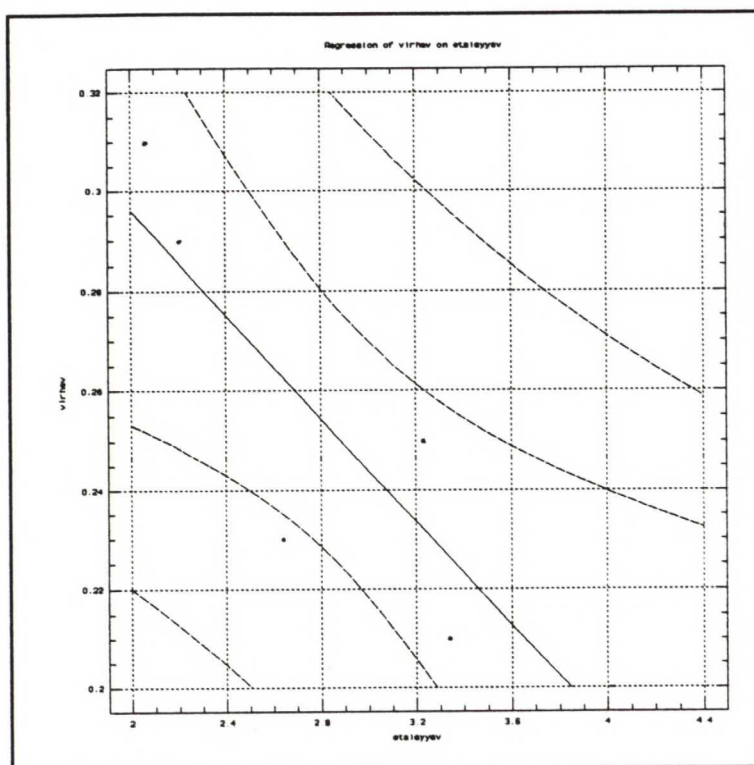
Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhep		Independent variable: etkanta		
Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.0878969	0.071844	1.22344	.28831
Slope	0.0132878	0.0453999	0.292684	.78432

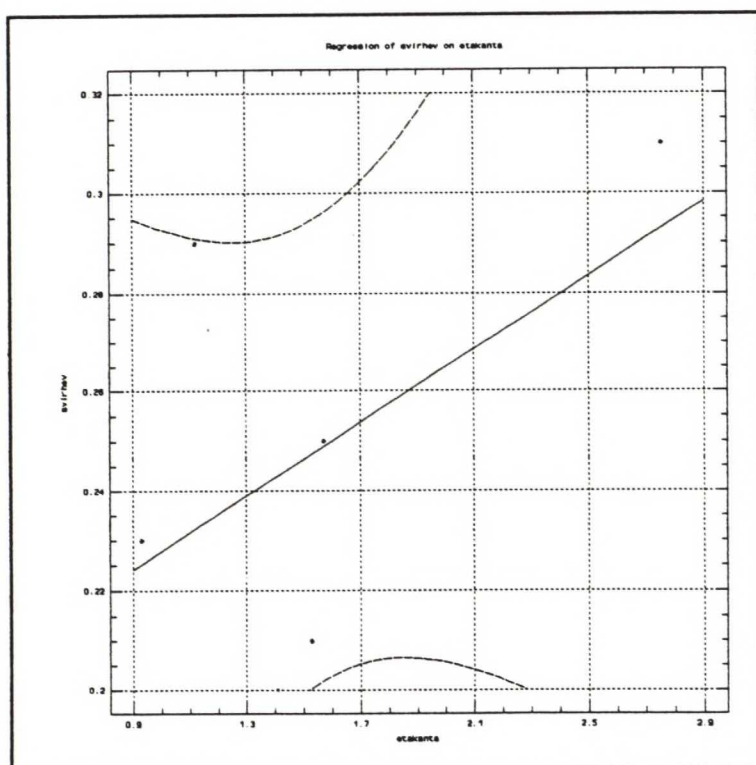
Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0000646	1	.0000646	.085664	.78432
Error	.0030187	4	.0007547		
Total (Corr.)	.0030833	5			

Correlation Coefficient = 0.1448 R-squared = 2.10 percent
Std. Error of Est. = 0.0274713



Vaakalatta, vaaka-akselilla on etäisyys, pystyakselilla on virhe.



Vaakalatta, vaaka-akselilla on etäisyyden suhde kannan pituuteen, pystyakselilla on virhe.

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: virhev

Independent variable: etaisyysv

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.40014	0.0403384	9.91956	.00058
Slope	-0.052051	0.0134642	-3.86587	.01806

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.007639	1	.007639	14.94494	.01806
Error	.0020445	4	.0005111		
Total (Corr.)	.0096833	5			

Correlation Coefficient = -0.888179
 Stnd. Error of Est. = 0.0226082

R-squared = 78.89 percent

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: svirhev

Independent variable: etakanta

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob. Level
Intercept	0.19067	0.0482546	3.95134	.01680
Slope	0.0371267	0.0290932	1.27613	.27097

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.0028017	1	.0028017	1.628507	.27097
Error	.0068816	4	.0017204		
Total (Corr.)	.0096833	5			

Correlation Coefficient = 0.537896
 Stnd. Error of Est. = 0.0414778

R-squared = 28.93 percent